



José Pedro Pereira Figueiredo

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Método analítico para a avaliação da espessura de pavimentos flexíveis com Radar de Prospeção

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Estruturas

Orientadora: Doutora Vânia Marecos,
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Coorientadora: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar Convidada,
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Ildi Cismaşiu, Professora Auxiliar,
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Doutora Zuzana Dimitrovová, Professora Auxiliar,
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa

Vogal: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar Convidada,
Faculdade Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2019

Medição da espessura de camadas em contínuo. Influencia na resposta estrutural de pavimentos flexíveis.

Copyright © José Pedro Pereira Figueiredo, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer às minhas orientadoras, Doutoradas Simona Fontul e Vânia Marecos pela infindável ajuda, apoio e orientação que me deram ao longo da criação desta tese bem como a simpatia e facilidade de abordagem que sempre manifestaram ao longo dos vários meses de trabalho juntos, sem elas esta tese não era possível.

Gostaria de agradecer ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela oportunidade de realizar o estágio, bem como todas as excelentes condições que me foram disponibilizadas durante esta etapa e também aos funcionários do LNEC que ajudaram a tornar a realização das campanhas de ensaios experimentais numa atividade bem disposta e de fácil realização.

Agradeço também aos meus colegas e amigos Miguel Pontes, João Ferreira, Filipe Nogueira, Filipa Silva, André Galego, Rita Rodrigues, Licínio Cruz, Márcia Carvalho e Gonçalo Santos pelo ânimo e excelentes momentos partilhados durante esta etapa.

Por fim quero deixar uma palavra de apreço à minha família que sempre me encorajou em momentos de desalento e me deram confiança para continuar e concluir este curso.

De mim os mais sentidos e sinceros votos de agradecimento e apreço a todos.

RESUMO

A análise não destrutiva de pavimentos através de métodos de rápida aplicação no terreno e consequente interpretação dos seus dados recolhidos, apresenta-se como uma ferramenta de grande importância face aos tradicionais métodos destrutivos. Este estudo centra-se no equipamento não destrutivo Radar de Prospeção, utilizado para a determinação da espessura de camadas de pavimentos, informação importante para avaliação estrutural de pavimentos, tendo um grande potencial de aplicação, bem como vantagens significativas quando comparado com os métodos tradicionais, destrutivos, como a extração de carotes e poços de sondagem.

Na presente dissertação pretende-se desenvolver e comprovar a fiabilidade de um novo método de interpretação de dados utilizando o Radar, bem como avaliar a sua precisão na determinação da espessura de camada de mistura betuminosa em pavimentos flexíveis.

Foram inicialmente estudados os princípios físicos relacionados com ondas eletromagnéticas, bem como estudadas as metodologias existentes de ensaio com Radar, sendo, como objetivo principal, aprofundado um novo conceito de interpretação Ponto Médio Comum para as antenas suspensas (CMP-AC), automatizando o seu cálculo analítico e validando a sua metodologia de aplicação em campo.

Uma vez definido o cálculo analítico, este foi calibrado e implementado com base em dados de medições existentes realizadas em modelos físicos de pavimentos flexíveis com diferentes espessuras de camada de mistura betuminosa. O bom conhecimento das características destes pavimentos e as condições controladas da sua realização, permitiu uma menor influência de variáveis externas para confirmar o desenvolvimento do método.

Após o aperfeiçoamento do novo método de análise, foi realizado um conjunto de ensaios de campo com o objetivo de testar e comprovar o método num caso de aplicação real. Os resultados obtidos foram comparados com espessuras reais das camadas, obtidas através da extração de carotes.

Foi também elaborado um guia de regras, sugestões e procedimentos adequados para a análise da espessura de pavimentos flexíveis com aplicação do novo método, utilizando o radar de prospeção, bem como elaboradas sugestões para trabalhos futuros realizados nesta área.

Os resultados obtidos foram promissores e a metodologia de ensaio e interpretação analítica desenvolvida aqui promove a aplicação deste conceito de ensaio para medições em pavimentos, para avaliação da espessura da camada com a função estrutural mais importante, a camada em misturas betuminosas e com a redução da necessidade de realização de ensaios destrutivos.

Palavras chave: Radar de Prospeção, ensaio não destrutivo, pavimentos, Ponto Médio Comum (CMP), espessura da camada

ABSTRACT

The non-destructive analysis of pavements by methods of fast application in the field and the results analysis represents a tool of great importance compared to the traditional destructive methods. This study focuses on Ground Penetrating Radar (GPR) a non-destructive test, used for the assessment of the thicknesses of pavement layers, crucial information for structural pavement evaluation. GPR has a great application potential as well as significant advantages when comparing to traditional, destructive methods, such as core extraction and test pits.

The present dissertation aims to develop and prove the reliability of a new data interpretation method using GPR, as well as to evaluate its accuracy in determining the asphalt layer thickness of flexible pavements.

The physical principles related to electromagnetic waves were initially studied, as well as the existing GPR methodologies. The main objective of this study was to deepen a new concept of interpretation, Common Mid-Point for Air Coupled antennas (CMP-AC), automating its use, through analytical calculation and validating the methodology for in field application.

Once the analytical calculation was defined, it was calibrated and implemented based on existing measurements performed on real scale physical models of flexible pavements with different asphalt layer thicknesses. The detailed knowledge of the characteristics of these pavements and the controlled conditions of their construction, allowed to reduce the influence of external variables and to confirm the method developed.

After perfecting the new method of analysis, a set of field trials were carried out to test and validated the method in a real application case. The results obtained were compared with the actual thicknesses of the layers, obtained through the extraction of cores.

An application guide, suggestions and appropriate procedures for analysing the thickness of flexible pavements using new method, was also presented, as well as suggestions for future work in this area.

The results obtained were promising and the test methodology and its analytical interpretation developed here promotes the application of this test concept to pavement evaluation, to estimate the thickness of the asphalt layer that has the most important structural function in flexible pavements, besides reducing the need for destructive testing.

Key words: Ground Penetrating Radar (GPR), non-destructive test, pavement, Common Mid-Point (CMP), layer thickness

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. FUNCIONAMENTO DO RADAR E APLICAÇÃO NA AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS	3
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
2.2. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	3
2.3. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DE CAMADAS BETUMINOSAS	4
2.4. RADAR DE PROSPEÇÃO	5
2.5. METODOLOGIAS DE ENSAIO COM RADAR	9
2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	10
3. NOVO MÉTODO ANALÍTICO DE CÁLCULO DE ESPESSURAS	11
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	11
3.2. MOTIVAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO	11
3.3. METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DESENVOLVIDA	12
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
4. CALIBRAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO NOVO MÉTODO COM ENSAIOS EM MODELO FÍSICO	25
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
4.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO	25
4.3. ANÁLISE DE DADOS	28
4.4. PRECISÃO DE RESULTADOS	35
4.5. NORMAS E PROCEDIMENTOS RECOMENDADOS	37
4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
5. APLICAÇÃO DO NOVO MÉTODO EM ENSAIOS DE CAMPO	41
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	41
5.2. DESCRIÇÃO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL EM ESTUDO	41
5.3. ENSAIO COM RADAR	43

5.4.	SONDAGENS À ROTAÇÃO	44
5.5.	ANÁLISE DE DADOS DE RADAR.....	45
5.6.	ANÁLISE DAS CAROTES	52
5.7.	PRECISÃO DE RESULTADOS	53
5.8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS EM UM PAVIMENTO FLEXÍVEL E RÍGIDO.....	4
FIGURA 2.2 –EXTRAÇÃO DE CAROTES NUMA VIA, (KARASU, 2015).	5
FIGURA 2.3 - EXEMPLO DE UM RADAR DE ANTENAS SUSPENSAS.	6
FIGURA 2.4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA LEITURA RADAR, ADAPTADO DE (FONTUL, 2004).....	6
FIGURA 2.5 - REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DO PERCURSO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.	7
FIGURA 2.6 - REPRESENTAÇÃO APROXIMADA DO PERCURSO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.	7
FIGURA 2.7 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DE ENSAIO RADAR TRADICIONAL.	9
FIGURA 3.1 – EXEMPLO DA METODOLOGIA DE ENSAIO CMP PARA ANTENAS DE CONTACTO, ADAPTADO DE (SENSOFT, 2019).....	12
FIGURA 3.2 - EXEMPLO DA METODOLOGIA DE ENSAIO CMP ADAPTADA PARA ANTENAS SUSPENSAS. ...	13
FIGURA 3.3 - EXEMPLO DE UM PERFIL DE REFLEXÃO (A) E DE UM RADARGRAMA (B).	14
FIGURA 3.4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM PERFIL DE REFLEXÃO RADAR COM A NOMENCLATURA ADAPTADA.	15
FIGURA 3.5– GRÁFICO TIPO DO CONJUNTO DE PONTOS REPRESENTATIVOS DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO.....	16
FIGURA 3.6- GRÁFICO TIPO DO CONJUNTO DE PONTOS REPRESENTATIVOS DA PRIMEIRA CAMADA DO PAVIMENTO.....	20
FIGURA 3.7– DIAGRAMA DO PERCURSO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS QUANDO $N=0$	21
FIGURA 3.8 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DESENVOLVIDA.....	22
FIGURA 3.9 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA.	23
FIGURA 4.1– REPRESENTAÇÃO DAS CAMADAS DO MODELO FÍSICO.	25
FIGURA 4.2– ANTENAS DE RADAR UTILIZADAS.	26
FIGURA 4.3– DIAGRAMA DO AFASTAMENTO DAS ANTENAS NOS ENSAIOS DE MODELO FÍSICO ESTACIONÁRIO (A,B1,B2 E C).	27
FIGURA 4.4- DIAGRAMA DO AFASTAMENTO DAS ANTENAS NO ENSAIO EM CONTÍNUO DE MODELO FÍSICO (D).....	27
FIGURA 4.5– REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS LEITURAS DOS ENSAIOS A, B1, B2 E C.	29
FIGURA 4.6– PONTOS REPRESENTATIVOS DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO PARA CADA ENSAIO.	30

FIGURA 4.7– GRÁFICO DO ERRO DA HIPÉRBOLE APROXIMADA EM RELAÇÃO AO SEU VALOR T0 PARA OS ENSAIOS A, B1, B2 E C.	30
FIGURA 4.8– CONJUNTO DE PONTOS REFERENTES À SUPERFÍCIE E À BASE DA CAMADA S1.....	31
FIGURA 4.9– REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS LEITURAS DO ENSAIO D.....	32
FIGURA 4.10– PONTOS REPRESENTATIVOS DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO PARA O ENSAIO D.	33
FIGURA 4.11– GRÁFICO DO ERRO DA HIPÉRBOLE APROXIMADA POR VALOR T0 NO ENSAIO D.....	33
FIGURA 4.12– CONJUNTO DE PONTOS REFERENTES À CAMADA S1.....	34
FIGURA 4.13– REPRESENTAÇÃO DO INTERVALO DE TEMPO PARA O ENSAIO A.	34
FIGURA 4.14 – COMPARAÇÃO DAS ESPESSURAS MEDIDAS EM CAROTES E ESTIMADAS COM O RADAR PELOS MÉTODOS SRM E CMP-AC ANALÍTICO.	36
FIGURA 4.15 - ESTABILIDADE DA AMPLITUDE DE ONDAS GPR EM FUNÇÃO DO TEMPO, ADAPTADO DE (PAJEWSKI <i>ET AL.</i> , 2018).....	39
FIGURA 5.1 – PAVIMENTO ENSAIADO.....	41
FIGURA 5.2 – LAJE RETIRADA DO PAVIMENTO ENSAIADO APÓS O REFORÇO.	42
FIGURA 5.3- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO ENSAIADO.	42
FIGURA 5.4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ALINHAMENTO DE ENSAIO COM RADAR.	43
FIGURA 5.5– REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE CAMPO.....	43
FIGURA 5.6 – REALIZAÇÃO DE SONDAGENS DE ROTAÇÃO NO PAVIMENTO EM ESTUDO.....	44
FIGURA 5.7 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE ONDE FORAM EXTRAÍDAS CAROTES.....	44
FIGURA 5.8– GRÁFICO DE AMPLITUDES DE REFLEXÃO MEDIDOS COM RADAR NUM PONTO DE ENSAIO .45	
FIGURA 5.9 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS LEITURAS DO ENSAIO E NO PONTO DE CONTROLE C5. .46	
FIGURA 5.10 - PONTOS REPRESENTATIVOS DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO PARA O ENSAIO E, NO PONTO DE CONTROLE C5.....	47
FIGURA 5.11 - GRÁFICO DO ERRO DA HIPÉRBOLE APROXIMADA POR VALOR T0 NO ENSAIO E.....	47
FIGURA 5.12 - PONTOS REPRESENTATIVOS DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO PARA O ENSAIO E, NO PONTO DE CONTROLE C5, APÓS CORREÇÃO DO TEMPO ZERO TEÓRICO.	48
FIGURA 5.13 - CONJUNTO DE PONTOS REFERENTES À SUPERFÍCIE DA CAMADA S1 E INTERFACE DAS CAMADAS S1B COM S2, NO PONTO DE CONTROLE C5.	48
FIGURA 5.14 – SEGUNDA ABORDAGEM DE TRATAMENTO DOS DADOS DE ENSAIOS DE CAMPO.....	49
FIGURA 5.15 – EXEMPLO DO PROCESSO DE SOMA DE AMPLITUDES NO INTERVALO DE 2,5 A 7,5 M.....	50
FIGURA 5.16 – ESPESSURA ESTIMADA PELO MÉTODO CMP-AC.	51
FIGURA 5.17 – FOTOGRAFIA DAS CAROTES EXTRAÍDAS NOS PONTOS DE CONTROLE.	52

FIGURA 5.18 – EXEMPLO DA IRREGULARIDADE DA ESPESSURA NA CAROTE DO PONTO DE CONTROLE

C15. 53

FIGURA 5.19 – COMPARAÇÃO DA ESPESSURA SRM, CMP-AC, CAROTES. 54

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 - VÁRIOS VALORES DE CONSTATANTE DIELÉTRICA PARA DIVERSOS MATERIAIS, ADAPTADO DE (JOL, 2009).....	8
TABELA 4.1 - ESPESSURA DA CAMADA S1 NOS ENSAIOS REALIZADOS	26
TABELA 4.2 – MATRIZ [A] GERADA PARA O ENSAIO A - VERSÃO RESUMIDA.	28
TABELA 4.3 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS NA CAMADA SUPERFICIAL NOS VÁRIOS ENSAIOS.	32
TABELA 4.4- VALORES DAS ESPESSURAS CALCULADAS NOS ENSAIOS DE MODELO FÍSICO.	35
TABELA 4.5 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DE ESPESSURA SRM, CMP-AC E CAROTES NOS ENSAIOS DE MODELO FÍSICO.	35
TABELA 4.6 - VALORES DA DIFERENÇA E PERCENTAGEM DE ERRO NOS ENSAIOS DE MODELO FÍSICO. .	36
TABELA 4.7 – VALORES GUIA PARA ESCOLHA DE VALORES DE FREQUÊNCIA (ASTM D4748-10, 2012)	37
TABELA 5.1 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO E ESPESSURA ESTIMADA NO ENSAIO E AO LONGO DOS OITO PONTOS DE CONTROLE PARA O MÉTODO CMP-AC.....	49
TABELA 5.2 - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO E ESPESSURA EQUIVALENTE ESTIMADA NO ENSAIO E AO LONGO DOS QUATRO INTERVALOS ESCOLHIDOS, CMP-AC.	50
TABELA 5.3 – ESPESSURA ESTIMADA DE 10 EM 10 CM NO INTERVALO DE 10 A 15 M.	51
TABELA 5.4 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DAS ESPESSURAS DOS PONTOS DE CONTROLO.....	52
TABELA 5.5 - VALORES DE ESPESSURA MEDIDA E ESTIMADA NOS ENSAIOS DE CAMPO.	53
TABELA 5.6 – VALORES DA DIFERENÇA E PERCENTAGEM DE ERRO NOS ENSAIOS DE CAMPO.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

GPR – Ground Penetrating Radar

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Radar – Radar de Prospeção

CMP – Método do ponto médio comum

CMP-AC – Método do ponto médio comum com antenas suspensas

SRM – Método da reflexão superficial

c – Velocidade de propagação da luz no vácuo (0,3 m/ns)

ε – Constante dielétrica

h_1 – Espessura da camada de betuminoso

t_0 – Valor do ponto de interceção com o eixo das ordenadas

$t_{m\acute{a}x}$ – Janela temporal do ensaio CMP-AC

$[A]$ – Matriz de amplitudes gerada

$t_{Am\acute{a}x}$ – Tempo correspondente á amplitude máxima no intervalo referido

$[A_{sp}]$ – Matriz da superfície do pavimento flexível

$[A_{prox}]$ – Matriz da aproximação hiperbólica

$[A_c]$ – Matriz da superfície do pavimento flexível com intervalo temporal corrigido

$[A_b]$ – Matriz da base do pavimento flexível

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Com o advento tecnológico pós segunda guerra mundial os dispositivos de Radar (Radio Detection and Ranging) começaram a ser estudados pelo seu potencial militar na identificação de objetos ou dispositivos no solo. Vários métodos de relativa facilidade de aplicação no campo começaram a ser desenvolvidos rapidamente surgindo o interesse de outras áreas nestes processos. Este facto juntamente com a crescente disponibilidade comercial dos equipamentos de radar contribuiu significativamente para o início da sua aplicação na área da engenharia civil.

Atualmente, a nível nacional, com a existência de uma rede rodoviária e aeroportuária onde a grande maioria dos traçados previstos se encontram concluídos, ocorreu uma mudança do foco nos objetivos de engenharia de pavimentos, sendo a principal preocupação a manutenção e reabilitação e não a construção.

A manutenção preventiva a realizar em pavimentos constitui uma boa oportunidade para a utilização do Radar de Prospeção, tirando proveito das suas vantagens. A principal aplicação do Radar de Prospeção em pavimentos é a recolha de dados referentes à espessura das camadas ligadas e não ligadas da via, ao longo de grandes extensões, de forma contínua e não destrutiva, com relativa rapidez no processo e sem necessidade de interrupção do tráfego.

Pelo contrário, os métodos tradicionais para a medição de espessura em pavimentos, como a extração de carotes ou poços de sondagens, são métodos destrutivos, implicam a interrupção da via ensaiada e apenas fornecem informações pontuais. A extração de carotes embora sendo de fácil aplicação no terreno, não permite a recolha de informação sobre camadas de agregados não ligados, sendo a sua realização em grande escala morosa. A realização de poços de sondagem, apresenta a vantagem de fornecer dados sobre as camadas de agregados, mas acarreta um maior impacto para o utente da via, pavimento e mais equipamentos.

Em suma, o equipamento de Radar de Prospeção, referido na presente dissertação apenas como Radar, contorna os principais problemas dos métodos tradicionais, sendo a sua maior desvantagem a complexidade da interpretação dos dados medidos (Pajewski *et al.*, 2018).

Dada a importância do conhecimento das espessuras das camadas de pavimento para sua avaliação estrutural e, atendendo ao facto de que o foco atual está dirigido para as atividades de manutenção e reabilitação, pretende-se com este trabalho contribuir para uma menor interferência no tráfego durante a realização de ensaios para a medição das espessuras. Neste sentido, pretende-se tirar partido das potencialidades do Radar e da evolução tecnológica que tem ocorrido, e estudar alternativas que levem à redução do número de ensaios destrutivos necessários para a sua interpretação.

1.2. Objetivos e Metodologia

O principal objetivo de estudo da presente dissertação é contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da espessura de pavimentos flexíveis, sem realização carotes, com recurso ao Radar.

Para este efeito, propõe-se o estudo da adequabilidade da aplicação de um novo método para a avaliação de pavimentos com recurso a antenas suspensas e o desenvolvimento de um processo de cálculo para automatizar a sua implementação.

Para atingir estes objetivos foi utilizada a seguinte metodologia:

- Estudo dos conceitos físicos e matemáticos para fundamento e aplicabilidade do método.
- Criação de uma nova metodologia de ensaio e sistematização da aplicação da mesma.
- Aplicação do programa de cálculo da espessura a dados reais com recurso a ensaios de modelo físico desenvolvidos em condições controladas em laboratório com menor variabilidade de fatores externos.
- Validação da aplicabilidade da metodologia desenvolvida através da realização de ensaios de campo em ambientes com presença de maior numero de variáveis aleatórias, bem como fatores de alteração dos dados recolhidos
- Realização de ensaios de modelo físico e análise dos dados para determinação da espessura da camada de misturas betuminosas do pavimento e comprovação do método de interpretação de dados.
- Comparação do erro obtido através dos métodos não destrutivos com métodos destrutivos.
- Elaboração de um guia de sugestões e procedimentos recomendados de modo a obter resultados fiáveis diminuindo fatores de erro.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, incluindo este capítulo de introdução.

O Capítulo 2 engloba uma breve descrição dos tipos de pavimentos e métodos mais utilizados para determinação da espessura de camadas, seguida de uma apresentação sucinta do funcionamento do Radar, explicando os princípios físicos relativos às ondas eletromagnéticas emitidas pelas antenas, bem como os princípios de reflexão de ondas.

No Capítulo 3 é apresentado o novo método analítico, desenvolvido na presente dissertação, com a completa descrição do procedimento de análise.

No Capítulo 4 é descrito o procedimento de ensaio laboratorial em modelo físico que serviu de base para a calibração e implementação do novo método. É apresentado o processamento de dados e a análise dos resultados obtidos. É ainda definido um procedimento de realização e ensaios em campo. Por fim, os resultados do novo método são comparados com os obtidos através dos métodos tradicionais de medição de espessura em pavimentos.

O Capítulo 5 apresenta os ensaios de campo realizados para a validação da metodologia desenvolvida. É efetuada uma descrição dos procedimentos de ensaio e do tratamento dos dados recolhidos, sendo por fim comparadas as espessuras das camadas determinadas utilizando o novo método desenvolvido nesta dissertação com carotes extraídas do pavimento.

Finalmente, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões e retiram-se inferências sobre o trabalho desenvolvido, bem como, sugestões para trabalhos futuros a desenvolver nesta área.

2. Funcionamento do Radar e aplicação na avaliação de pavimentos

2.1. Considerações iniciais

Este capítulo inicia com uma abordagem aos vários tipos de pavimentos rodoviários, com uma breve descrição das suas diferenças.

A presente dissertação pretende contribuir para a avaliação da espessura de pavimentos flexíveis, pois estes representam a maioria dos pavimentos existentes na Europa, focando-se na camada de misturas betuminosas, dado que a variação da espessura desta camada tem maior influência na resposta estrutural do pavimento.

Serão descritos os métodos correntes de determinação de espessura das camadas de pavimentos flexíveis, os quais se dividem em métodos destrutivos e não destrutivos.

Relativamente aos métodos não destrutivos será apresentada uma descrição genérica do Radar e dos princípios matemáticos e físicos por detrás do seu funcionamento.

Conclui-se o capítulo com a apresentação da metodologia de ensaio com Radar tradicional, bem como com uma metodologia alternativa que não implica a realização de ensaios destrutivos.

2.2. Pavimentos rodoviários

Os pavimentos rodoviários são constituídos por um sistema de camadas finitas assentes numa fundação (Branco *et al.*, 2011):

- A camada superior tem como funções receber e transmitir as cargas, através de um sistema de camadas, com valores de tensão sucessivamente menores, bem como resistir ao desgaste resultante do uso da via.
- A camada de base pretende distribuir os esforços da camada superficial às camadas inferiores.
- A camada de sub-base tem as funções de drenagem, bem como de transferência de cargas entre a camada base e o solo de fundação.

Quanto à sua constituição os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, rígidos ou semirrígidos.

Um pavimento flexível é composto por uma camada superficial, constituída por mistura betuminosa, uma mistura de agregados com betume como ligante; uma camada base, composta por agregados ligados ou não ligados e uma camada de sub-base, composta por materiais granulares e solo de fundação da zona de implantação do pavimento, tratado ou não, dependendo das condições.

Os pavimentos flexíveis apresentam camadas superficiais relativamente pouco espessas, dependendo portanto, de uma boa compactação das camadas granulares para o controlo de deformações, uma vez que a dissipação de cargas ocorre de modo vertical para as camadas subjacentes, com pouca dissipação lateral de tensões relativamente ao plano do pavimento (Figura 2.1).

Um pavimento rígido é constituído por uma laje de betão que funciona simultaneamente como camada de superficial de desgaste e camada estrutural de base, apresentando a laje uma resistência à flexão consideravelmente maior que um pavimento flexível. Este tipo de pavimento não apresenta de modo geral deformações consideráveis.

Ao contrário dos pavimentos flexíveis este tipo de pavimento não depende unicamente da distribuição sucessiva de cargas para as camadas subjacentes, mas também da dissipação das cargas aplicadas na via sobre a área de laje, dependendo menos da capacidade de carga dos solos de fundação (Figura 2.1).

Os pavimentos semirrígidos são um tipo de pavimento com características intermédias entre o pavimento flexível e o pavimento rígido, constituídos geralmente por uma camada superficial em mistura betuminosa colocada em cima de uma laje de betão de cimento.

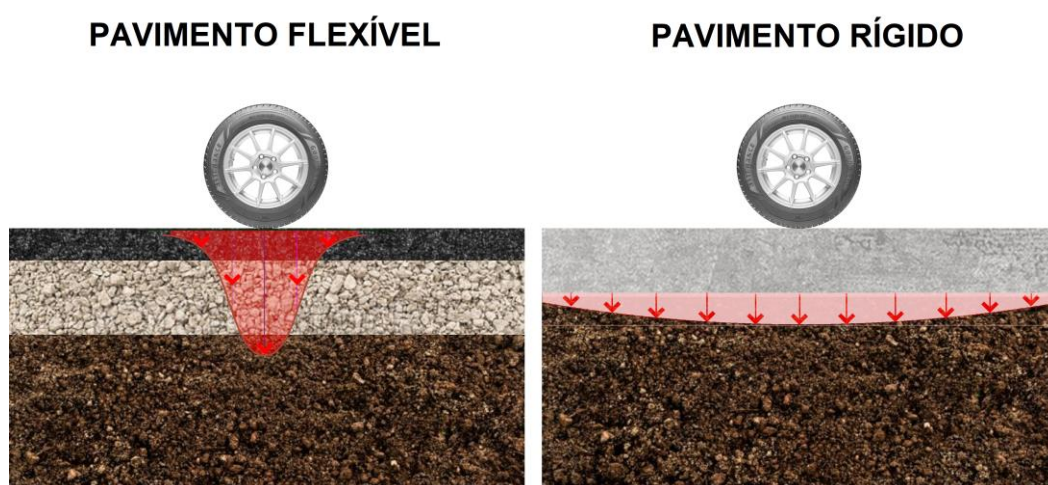


Figura 2.1 – Distribuição de Cargas em um pavimento flexível e rígido.

Um pavimento flexível, comparativamente a um pavimento rígido, apresenta várias vantagens como um custo inicial de construção inferior e uma maior capacidade de suportar ciclos térmicos de expansão e contração, e as respetivas tensões geradas, não necessitando de juntas de dilatação. (Reis, 2009)

2.3. Métodos de determinação da espessura de camadas betuminosas

A identificação da espessura das camadas dos pavimentos, em paralelo com a realização de ensaios de carga (com o defletómetro de impacto por exemplo), permite a criação de modelos representativos do pavimento e a estimativa de tempo de vida útil e da capacidade de carga do pavimento.

Os métodos de determinação de espessuras de pavimentos dividem-se em dois grandes ramos, destrutivos e não destrutivos.

O ensaio destrutivo mais comum é a realização de sondagens à rotação com extração de carotes (Figura 2.2). Sendo um método destrutivo, este implica a necessidade de reparação do

pavimento após a sua realização, o que limita a sua aplicação ao longo de alinhamentos com grande extensão. Como se trata de um método discreto apenas permite obter informação precisa da espessura de cada ponto de ensaio, não fornecendo uma visão global da variação da espessura ao longo de todo o pavimento.



Figura 2.2 –Extração de carotes numa via, (Karasu, 2015).

A utilização do Radar, como alternativa não destrutiva para a determinação da espessura das camadas, é cada vez mais utilizada. Contudo, como se trata de um método de medição indireto ainda é usualmente acompanhado da extração de carotes (embora em número mais reduzido).

2.4. Radar de Prospeção

O Radar tem um grande leque de aplicações em diversas áreas: engenharia civil, geologia, arqueologia, sector militar, entre outras (Pérez-Gracia *et al.*, 2016).

A utilização do Radar na engenharia de pavimentos tem como principal aplicação a determinação da espessura de camadas. Mais recentemente surgiram novas utilizações como estimar a densidade (Al-Qadi *et al.*, 2002), o teor em água, identificação de defeitos sub-superficiais e estimar as propriedades mecânicas dos materiais constituintes do pavimento. (Antunes *et al.*, 2016)

O Radar funciona de forma não destrutiva através da emissão e receção de ondas eletromagnéticas. Estas ondas eletromagnéticas sofrem reflexão nas interfaces entre camadas com propriedades diferentes, (Fontul, 2004). São compostos por antenas emissora e recetora. Existem dois tipos de antenas, suspensas ou de contacto.

As antenas suspensas, como o nome indica encontram-se suspensas a cerca de 0,40-0,50 m do pavimento. Este facto permite a realização de ensaios à velocidade do tráfego (Figura 2.3).



Figura 2.3 - Exemplo de um Radar de antenas suspensas.

As antenas de contacto necessitam de estar fisicamente em contacto com a superfície do pavimento e não serão alvo de abordagem na presente dissertação, não sendo geralmente utilizadas na avaliação de pavimentos.

Para além das antenas, o Radar inclui ainda o sistema de registo de dados, um computador que permite a realização da medição e o armazenamento de dados.

Uma leitura Radar inclui um conjunto de informação relativa às ondas eletromagnéticas emitidas e refletidas, nomeadamente amplitudes, tempos de propagação e posição física do equipamento no instante da leitura, uma vez que estas leituras são realizadas em velocidade e as antenas emitem pulsos eletromagnéticos em intervalos faseados, realizando-se usualmente uma medição a cada 4 metros. O resultado destas medições são informações de sinal descontínuos, sendo representado na Figura 2.4 uma leitura típica obtida com Radar.

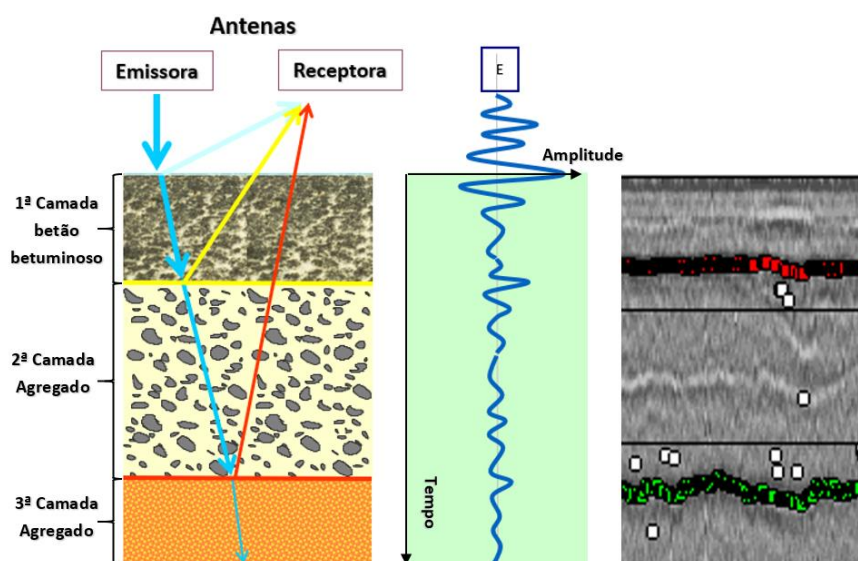


Figura 2.4 – Representação esquemática de uma leitura Radar, adaptado de (Fontul, 2004).

Apresenta-se de seguida uma breve introdução às bases físicas que regem o funcionamento do Radar. Para uma leitura mais completa recomenda-se a consulta de artigos específicos da área (Jol, 2009), (Daniels, 2004).

Como já foi referido, o Radar é na sua essência um emissor e recetor de pulsos eletromagnéticos de variadas frequências. Estes impulsos assumem o comportamento de ondas eletromagnéticas e embora grande parte da literatura represente a propagação destas ondas de modo simplificado por um feixe unidirecional (Figura 2.5), a representação mais próxima da realidade é um cone de propagação de ondas (Figura 2.6).

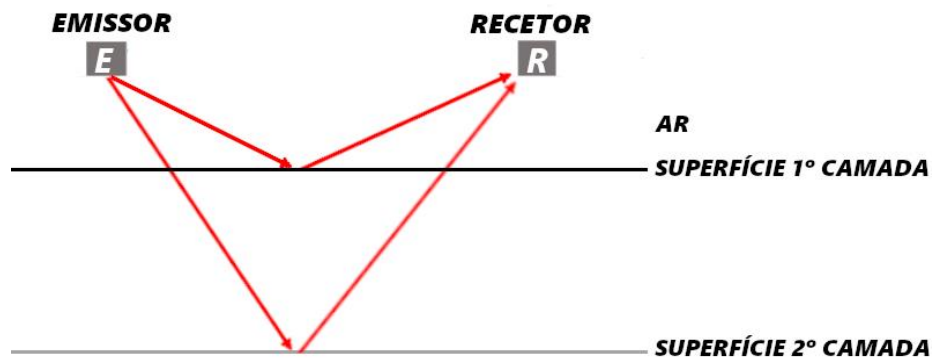


Figura 2.5 - Representação simplificada do percurso de ondas eletromagnéticas.

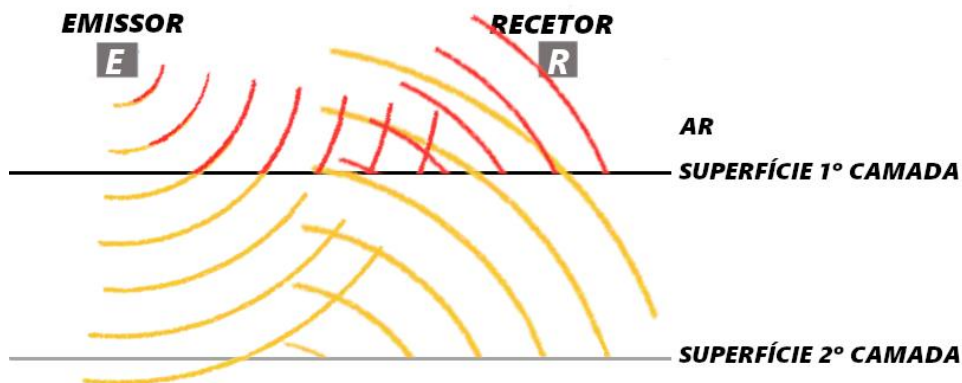


Figura 2.6 - Representação aproximada do percurso de ondas eletromagnéticas.

As ondas eletromagnéticas são o resultado da propagação de radiação, num meio físico ou no vácuo, que resultam da atuação de fontes de energia elétrica e magnética em simultâneo. A sua classificação depende da frequência, tendo no início do espectro ondas rádio, com baixa frequência e grande comprimento onda, e, na outra ponta do espectro, os raios gamma, com elevada frequência e baixo comprimento de onda.

A relação da frequência com o comprimento de onda é descrita pela equação (2.1) sendo estas grandezas inversamente proporcionais, a frequência em Hertz (f), é igual à velocidade de propagação da luz no vácuo sobre o comprimento de onda (λ) em metros.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Para estimar a espessura de uma camada de pavimento (h) através do uso do Radar, é necessário conhecer a velocidade de propagação da onda no meio (v) e o tempo de propagação da onda através desta camada (t).

$$h = \frac{v t}{2} \quad (2.2)$$

O tempo é medido diretamente pelo Radar, sendo a velocidade dependente da constante dielétrica do meio por onde a onda se propaga (ϵ), calculando-se através da equação (2.3).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2.3)$$

A constante dielétrica é uma característica do material e mede a permissividade dielétrica relativa em comparação com o vácuo, sendo por isso uma grandeza adimensional. O seu valor pode ser afetado de modo considerável por fatores externos, nomeadamente a presença de ar e de água, que apresentam constantes dielétricas muito diferentes, 1 e 80 respetivamente (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Vários valores de constante dielétrica para diversos materiais, adaptado de (Jol, 2009).

Material	
Ar	1
Argila (Seca)	2-20
Argila (Húmida)	15-40
Betão (Seco)	4-10
Betão (Húmido)	10-20
Água Doce(Líquida)	78-88
Água Doce (Sólida)	3
Água Salgada (Líquida)	81-88
Água Salgada (Sólida)	4-8
Granito (Seco)	5-8
Granito (Húmido)	5-15
Calcário (Seco)	4-8
Calcário (Húmido)	6-15
Arenito (Seco)	4-7
Arenito (Húmido)	6-15
Xisto (Saturado)	6-9
Areia (Seca)	3-6
Areia (Húmida)	10-30
Solo Arenoso (Seco)	4-6
Solo Arenoso (Húmido)	15-30
Solo Argiloso (Seco)	4-6
Solo Argiloso (Húmido)	10-15

No caso das misturas betuminosas como a sua composição é bastante variável a definição de um valor único para a constante dielétrica é bastante difícil. Para além deste facto é ainda necessário considerar a influência dos fatores externos, como o índice de vazios e a idade.

O processo tradicional de realização de ensaios com Radar, de modo a resolver a necessidade de determinar um valor de constante dielétrica, necessitam de uma componente de ensaios destrutivos. Estes consistem na extração de carotes, para a calibração dos resultados e estimativa da constante dielétrica.

Com estes carotes é possível conhecer a espessura do pavimento naqueles locais e, como foi referido o Radar fornece informações sobre o tempo de propagação da onda refletida nos mesmos sítios. Com estes dados e aplicando as equações (2.2) e (2.3) é determinado o valor da constante dielétrica, que é assumido como sendo constante ao longo de uma secção do pavimento.

No entanto, esta valor apenas traduz a realidade local do pavimento e consequentemente poderá induzir erros na análise dos dados.

2.5. Metodologias de ensaio com Radar

A metodologia tradicional de determinação da espessura de pavimentos utilizando Radar pode ser definida através do fluxograma representado na Figura 2.1.

Observando o fluxograma e de acordo com o referido no subcapítulo anterior é evidente as grandes desvantagens desta metodologia, a necessidade de realização de ensaios destrutivos para determinar a constante dielétrica, e o facto de que este valor apenas traduz uma realidade local, introduzindo erros no processo quando aplicado fora do ponto.

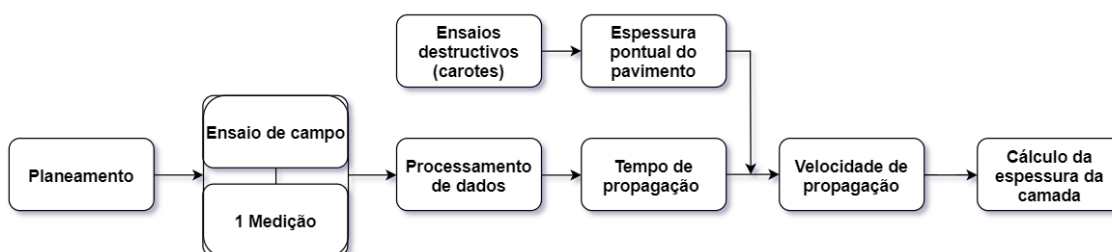


Figura 2.7 – Fluxograma da metodologia de ensaio Radar tradicional.

De modo a reduzir a necessidade de ensaios destrutivos para a obtenção dos valores da constante dielétrica, uma metodologia de análise alternativa, foi desenvolvida no presente trabalho. O novo método proposto na presente dissertação, será comparado com o método SRM (Fontul, 2004), e com o método tradicional, baseado na extração de carotes.

O método SRM consiste numa medição da reflexão numa placa metálica que representa um refletor perfeito. Em seguida as antenas percorrem o pavimento em estudo sendo registadas as amplitudes das ondas refletidas, bem como o tempo de propagação das ondas.

Conhecendo as amplitudes das reflexões na placa metálica e na superfície do pavimento aplicando a equação (2.4), (Saarenketo & Scullion, 2000) (Maser & Scullion, 1991) , é possível calcular a constante dielétrica da camada.

$$\varepsilon = \left[\frac{1 + \frac{A_{pav.}}{A_{metal}}}{1 - \frac{A_{pav.}}{A_{metal}}} \right]^2 \quad (2.4)$$

Onde “ A_{pav} ” e “ A_{metal} ” são respetivamente as amplitudes recolhidas pelo Radar do pavimento e da placa metálica.

Conhecendo a constante dielétrica aplicando as equações (2.2) e (2.3) é possível estimar a espessura do pavimento.

Este método, embora completamente não destrutivo, é muito sensível à condição da superfície da camada de pavimento, deste modo é bastante preciso para pavimentos homogêneos novos, onde as propriedades à superfície e na base do pavimento são as mesmas. Sendo menos preciso no caso de pavimentos mais antigos onde em profundidade existem alterações das características do meio.

2.6. Considerações finais

Este capítulo fornece ao leitor uma descrição dos tipos de pavimento existentes, o porquê da necessidade de realização de ensaios com Radar, bem como vantagens e aplicações de campo deste equipamento.

É também realizada uma breve apresentação das bases físicas por detrás do Radar, abordando brevemente os princípios físicos das ondas eletromagnéticas, bem como a constante dielétrica, uma propriedade importante para a análise de dados de Radar.

Por fim, são descritas e apresentadas as metodologias de ensaio e análise de dados tradicionais, a extração de carotes e SRM, sendo que este ultimo necessita de um menor numero de carotes.

3. Novo método analítico de cálculo de espessuras

3.1. Considerações iniciais

Neste capítulo é apresentado o método analítico de interpretação de dados de Radar para a determinação da espessura de pavimentos flexíveis desenvolvido nesta dissertação. É descrito em detalhe o seu funcionamento.

3.2. Motivação de desenvolvimento

Conforme já apresentado no capítulo anterior, as metodologias de ensaio com Radar utilizadas presentemente implicam a extração de carotes. Pretende-se com este estudo desenvolver de um método completamente não destrutivo e que se possa ser aplicado a qualquer tipo de pavimento flexível.

Existem alguns estudos que propõem novas abordagens para a medição de espessuras com Radar utilizando múltiplas antenas com a mesma frequência, sem a necessidade de recurso a carotes. Em (Baltazart et al., 2014) são utilizadas uma antena transmissora e duas recetoras e em (Leng & Al-Qadi, 2014) são usadas duas antenas transmissoras e uma recetora.

Estes estudos conduziram a bons resultados para a avaliação da espessura da camada de misturas betuminosas, no entanto, o facto de ser necessário utilizar múltiplas antenas é muito limitativo pois apesar de o Radar ser bastante útil na avaliação de pavimentos, ainda tem um custo relativamente elevado e não existem muitas entidades que possuam múltiplas antenas com a mesma frequência.

Um estudo recente, desenvolvido numa colaboração entre o LNEC e a Universidade de Vigo, no âmbito de uma Tese de Doutoramento (Marecos, 2018), propõe um método utilizando apenas um par de antenas suspensas para a medição da camada de misturas betuminosas, sem a necessidade de utilização de carotes, também com bons resultados. Contudo este método baseia-se em análises visuais e contém alguns passos de processamento que são realizados de forma manual, o que limita a sua utilização generalizada.

Tendo por base este ultimo estudo, pretende-se desenvolver um método analítico que processe os dados recolhidos, de forma automatizada, permitindo aumentar a precisão dos resultados e reduzir o tempo necessário para o seu processamento. A natureza analítica deste novo método irá possibilitar a interpretação de um grande volume de dados, num tempo reduzido. Esta melhoria permitirá diminuir o espaçamento dos pontos de medição, mesmo quando se analisam grandes extensões de pavimentos.

Note-se que, nos pavimentos flexíveis, a espessura da camada de misturas betuminosas tem uma influência muito relevante na resposta estrutural do pavimento. Desta forma, pretende-se que este método possa ser implementado de forma corrente na avaliação da espessura das camadas de misturas betuminosas em pavimentos.

3.3. Metodologia de processamento desenvolvida

O método analítico desenvolvido tem por base o método do ponto médio comum com antenas suspensas, CMP-AC, do inglês Common Mid-Point with Air-Coupled antennas, (Marecos *et al.*, 2018).

As bases do método CMP-AC surgem do método do ponto médio comum, CMP, do inglês “Common Mid-Point” (Al-Qadi *et al.*, 2002) (Maser *et al.*, 2002) que utiliza antenas de contacto,

Este método funciona colocando um par de antenas, uma emissora e uma recetora, afastadas entre si em várias distâncias (Figura 3.1). São realizadas leituras do tempo de reflexão das ondas eletromagnéticas em cada posição, que se relacionam com a velocidade de propagação das ondas no meio, usada no cálculo da espessura da camada (Daniels, 2004), (Jol, 2009).

Utilizando como ponto de partida este procedimento de ensaio e adaptando-o para aplicação em antenas suspensas por forma a permitir a análise de um pavimento em velocidade, este método deixa de ser um método pontual, ou localizado (Figura 3.2).

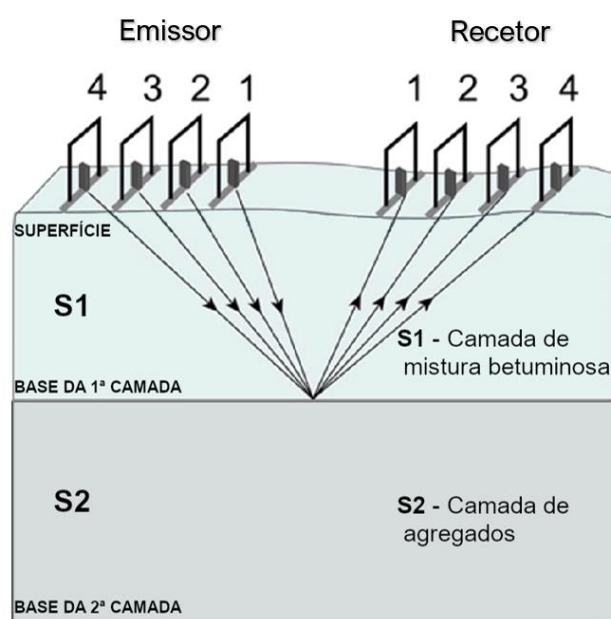


Figura 3.1 – Exemplo da metodologia de ensaio CMP para antenas de contacto, adaptado de (Sensoft, 2019).

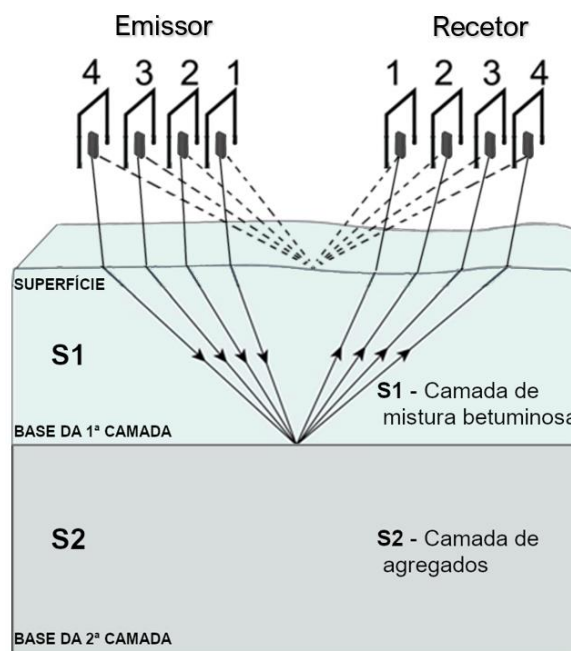


Figura 3.2 - Exemplo da metodologia de ensaio CMP adaptada para antenas suspensas.

Na Figura 3.3 é apresentado um exemplo de um perfil de reflexão (a) e de um radargrama (b), conjunto de perfis de reflexão obtidos variando o afastamento entre a antena emissora e recetora, aplicando a metodologia CMP adaptada a antenas suspensas num pavimento flexível.

Na Figura 3.3 (a) são visíveis os picos de amplitudes correspondentes à reflexão das ondas eletromagnéticas na superfície e em interfaces de camadas do pavimento. À medida que a profundidade aumenta a onda emitida vai sendo refletida e sofrendo absorção pelos materiais que atravessa ocorrendo uma gradual diminuição da intensidade da amplitude das reflexões. Juntando diferentes perfis de reflexão medidos variando os afastamentos entre antenas, obtém-se a Figura 3.3 (b) onde se identifica o andamento hiperbólico dos picos nas diferentes interfaces, característico do método CMP (Fontul, 2004).

No contexto do método CMP, a hipérbole das reflexões das ondas eletromagnéticas nas interfaces, está relacionada com a velocidade de propagação da onda no meio, o que permite a determinação da espessura da camada.

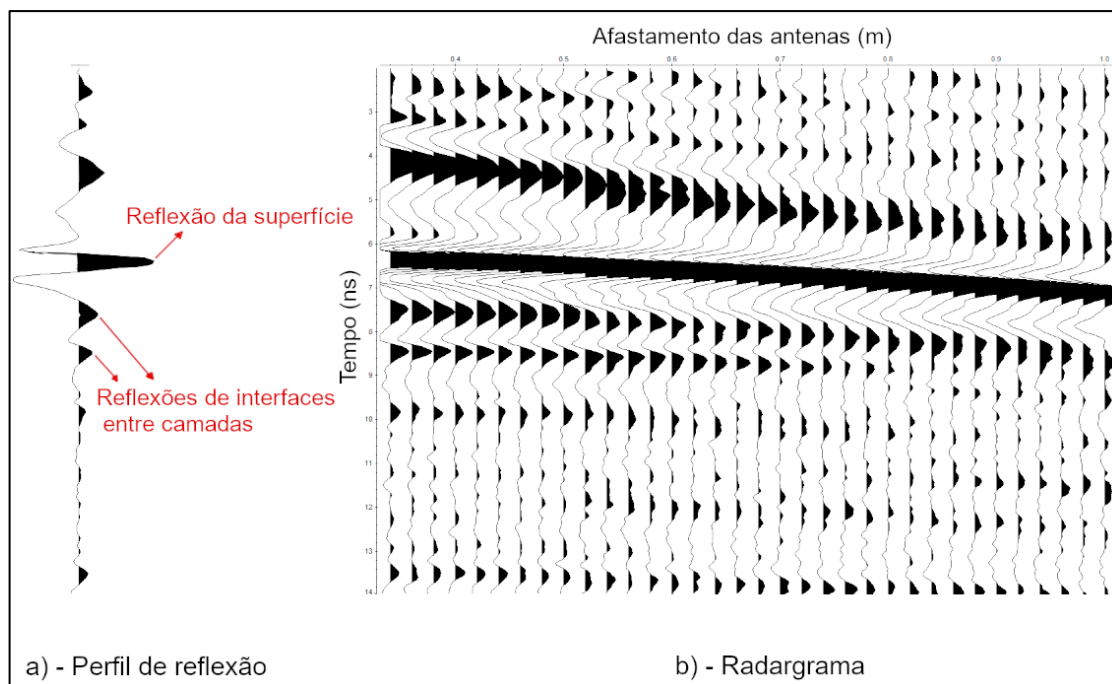


Figura 3.3 - Exemplo de um perfil de reflexão (a) e de um radargrama (b).

Em seguida, descreve-se os diferentes passos para o desenvolvimento do novo método analítico, a partir dos dados medidos com o Radar, para a determinação da espessura de camadas de misturas betuminosas (Scorpo & Cook, 2017).

Esta metodologia tem por base a estimação da velocidade de propagação da onda eletromagnética, a partir da aproximação da reflexão hiperbólica teórica da onda, à resposta medida com o Radar.

A recolha de dados de Radar é feita definido o número total de impulsos Ω e a janela de tempo do ensaio $t_{m\acute{a}x}$ e através da gravação de n ficheiros medidos no mesmo ponto médio comum, cada um correspondente a um afastamento de antena distinto. Na Figura 3.4 apresenta-se um perfil de reflexão genérico do Radar e identificam-se as variáveis atribuídas ao longo do trabalho desenvolvido.

Assim, é então definida uma nova matriz, $[A_{sp}]$, que representará a superfície do pavimento flexível.

A matriz apresenta a dimensão $(2 \times n_n)$ e contém na primeira linha o valor do afastamento das antenas (em metros) e na segunda o valor do instante de tempo correspondente à amplitude máxima (em nanossegundos).

$$[A_{sp}] = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & \dots & n_n \\ t_{Am\acute{a}x}(A_{[1,\Omega],1}) & t_{Am\acute{a}x}(A_{[1,\Omega],2}) & \dots & t_{Am\acute{a}x}(A_{[1,\Omega],n}) \end{bmatrix}$$

Representando graficamente esta matriz com os valores da primeira linha no eixo das abscissas e os valores da segunda linha no eixo das ordenadas, é obtido o conjunto de pontos representativos da reflexão das ondas eletromagnéticas na superfície do pavimento, Figura 3.5.

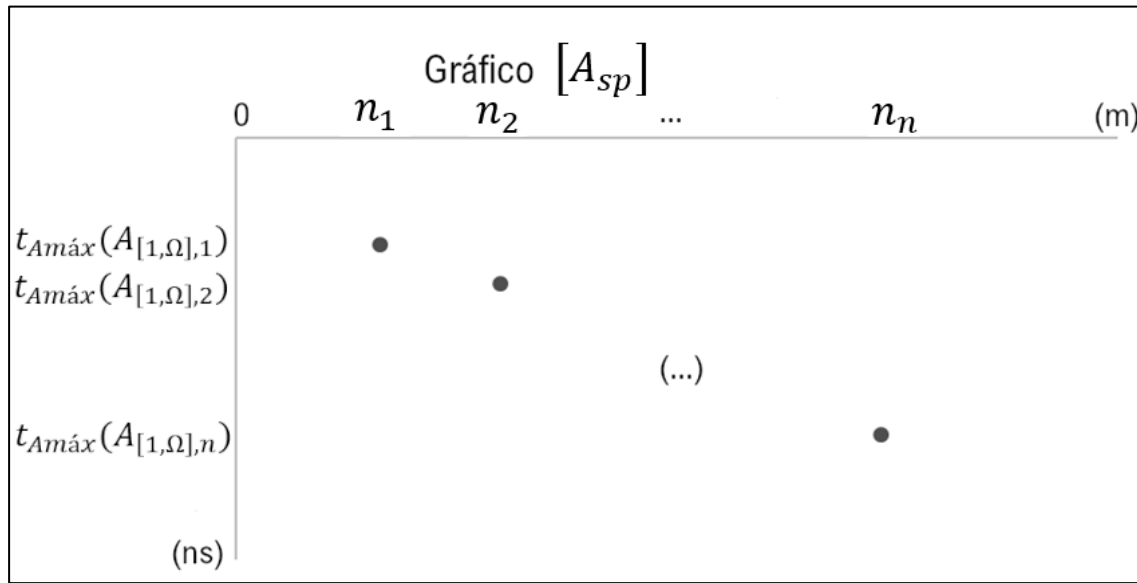


Figura 3.5– Gráfico tipo do conjunto de pontos representativos da superfície do pavimento.

Como já foi referido, as ondas eletromagnéticas refletidas assumem a forma hiperbólica. Nesse sentido, o próximo passo desta análise é a descrição da equação matemática desta hipérbole, passo fundamental para chegar ao valor de velocidade da onda na camada de mistura betuminosa do pavimento, uma vez que após a descrição matemática desta hipérbole se obtêm todos os elementos necessários à correção de “tempo zero” ou zero teórico.

Este tempo zero teórico traduz a necessidade de uniformização do intervalo de medida temporal num referencial partilhado por todas as leituras em todos os afastamentos de antenas, uma vez que o valor inicial de medição de tempo é dependente da configuração do sistema e das antenas de Radar utilizadas.

Quando é realizada a aquisição dos dados os tempos das janelas de registo de cada disposição de antenas não estão referenciados entre si em relação a um mesmo zero.

Esta correção de “tempo zero” permitirá acertar todos os inícios de tempo de cada medição num referencial temporal idêntico, necessário para uma precisa determinação da espessura.

A equação de uma hipérbole com foco sobre um referencial (x, y) é descrita pela equação (3.2):

$$\frac{y^2}{b^2} - \frac{x^2}{a^2} = 1 \quad (3.2)$$

Sendo b , designado geralmente por foco, o ponto onde a hipérbole intercepta o eixo das ordenadas. Aplicando ao caso descrito nesta dissertação altera-se a nomenclatura de b para t_0 , designando o ponto obtido caso a antena emissora fosse também a recetora, sendo a distancia hipotética entre as duas de 0 m.

O fator a traduz a abertura da hipérbole, que como já foi referido, no contexto de ondas eletromagnéticas emitidas pelo Radar está relacionado com a velocidade de propagação da onda na camada, através da equação (3.3):

$$a^2 = v^2 t_0^2 \quad (3.3)$$

Deste modo a equação matemática da hipérbole, fica então definida para o contexto deste trabalho pela equação (3.4):

$$\frac{y^2}{t_0^2} - \frac{x^2}{v^2 t_0^2} = 1 \quad (3.4)$$

Onde $\{x\} \in [n_1; n_n]$ e $\{y\} \in [t_{Amáx}(A_{[1,\Omega],1}); t_{Amáx}(A_{[1,\Omega],n})]$

Utilizando esta expressão é possível aproximar uma hipérbole ao conjunto de pontos representativos da superfície da primeira camada, apresentados na Figura 3.5.

Contudo, a definição desta hipérbole apresenta uma condição física necessária de ser verificada, a velocidade, uma vez que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no ar é aproximadamente igual a c .

Para além deste facto é importante notar que em nenhum conjunto de dados “reais” existe um valor de tempo zero t_0 , que, em conjunto com a condição de velocidade no meio (ar), satisfaça todos os pontos. É então necessário criar um processo iterativo de aproximação.

O processo de aproximação desenvolvido neste trabalho baseia-se em centrar uma hipérbole com t_0 calculado para o primeiro ponto ($x = n_1, y = \text{valor } t \text{ do } \max(A_{[1,\Omega],1}), v = 0.3$) através da modificação da equação (3.4).

$$t_0 = \sqrt{-\frac{x^2}{v^2} + y^2} \quad (3.5)$$

Através deste valor de t_0 são recalculados novos valores de y , designados y' para cada valor de x . Deste modo, uma primeira hipérbole de aproximação é gerada, que respeita a condição de passar no primeiro ponto de afastamento de antenas. Este detalhe é importante, pois, vários testes levados a cabo mostraram que o valor t_0 aproximado é tanto mais preciso quanto mais próximo for o ponto x utilizado do eixo das ordenadas.

De seguida, é então criada uma nova matriz de aproximação para a primeira iteração:

$$[Aprox] = [(y'_1 - y_1 + \Delta i) \quad (y'_2 - y_2 + \Delta i) \quad \dots \quad (y'_n - y_n + \Delta i)]$$

Onde y' representa o valor tempo gerado por imposição das condições x , y e t_0 calculados anteriormente

O valor de y representa o tempo “real” fornecido pelo equipamento de recolha de dados

A condição Δi designa o valor do incremento aplicado ao valor de $y = \text{valor } t \text{ do } \max(A_{[1,\Omega],1})$ para o qual o valor de t_0 em uso na equação foi calculado.

De seguida, é calculado o erro através da raiz quadrada das diferenças.

$$Erro = \sqrt{(y'_1 - y_1 + \Delta i)^2 + (y'_2 - y_2 + \Delta i)^2 \dots + (y'_n - y_n + \Delta i)^2} \quad (3.6)$$

De modo iterativo incrementos Δi constantes são aplicados ao valor $y = t_{Amáx}(A_{[1,\Omega],1})$, tornando-se este $y = t_{Amáx}(A_{[1,\Omega],1}) + \Delta i$

Por este processo são geradas um novo conjunto de condições, ($x = [n = 1]$, $y = \text{valor } t \text{ do } \max(A_{[1,\Omega],1}) + \Delta i$, $v = 0.3$) para o calculo de um novo t_0 , através da equação (3.5) apresentada atrás.

O processo é repetido para um número significativo de incrementos sendo calculado o erro para cada um deles.

É então construída uma matriz erro representativa das várias hipérboles de aproximação e o seu respetivo erro, de forma:

$$[Erro] = \begin{bmatrix} \Delta i_1 & \Delta i_2 & \dots & \Delta i_k \\ Erro(t_0^{gerado1}) & Erro(t_0^{gerado2}) & \dots & Erro(t_0^{gerado k}) \end{bmatrix}$$

Sendo k o numero de incrementos utilizados, valor este definido com base no bom senso do utilizador de acordo com a precisão e capacidade de processamento aplicada a cada caso particular.

Selecionando o valor mínimo do erro, representativo da menor diferença entre os valores de y' e y , entre a hipérbole gerada e os pontos obtidos para cada valor de x dos dados de cada ensaio é selecionado o valor de Δi associado ao erro mínimo.

Este valor de Δi representa a correção global necessária de aplicar a cada valor de t na matriz inicial $[A]$, deste modo:

$$[A_c] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_{1+\Delta i,1} & A_{1+\Delta i,2} & \dots & A_{1+\Delta i,n} \\ A_{2+\Delta i,1} & A_{2+\Delta i,2} & \dots & A_{2+\Delta i,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{\Omega+\Delta i,1} & A_{\Omega+\Delta i,2} & \dots & A_{\Omega+\Delta i,n} \end{bmatrix}$$

Após a definição da matriz $[A_c]$ é possível então identificar e tratar os dados referentes à base da camada de mistura betuminosa (S1).

Em primeiro lugar, de modo a isolar os pontos referentes à reflexão da onda na base desta camada é gerada de novo uma matriz, neste caso a matriz $[A_b]$, matriz esta constituída pelos valores de pico, representantes da interface entre a camada S1 e S2, ver Figura 3.2.

Contudo, a seleção de valores através do máximo não funciona uma vez que tal retorna os valores da superfície do pavimento e não da base da primeira camada, é necessário, portanto, encontrar o segundo valor mais alto da lista ou analisar no intervalo temporal posterior ao primeiro valor de pico, sendo ambos os métodos válidos.

$$[A_b] = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & \dots & n_n \\ 2^{\text{º}}t_{Amáx} A_{[0,\Omega+\Delta i],1} & 2^{\text{º}}t_{Amáx} A_{[0,\Omega+\Delta i],2} & \dots & 2^{\text{º}}t_{Amáx} A_{[0,\Omega+\Delta i],n} \end{bmatrix}$$

ou

$$[A_b] = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & \dots & n_n \\ t_{Amáx}(A_{[y_1+\Delta i,\Omega+\Delta i],1}) & t_{Amáx}(A_{[y_2+\Delta i,\Omega+\Delta i],2}) & \dots & t_{Amáx}(A_{[y_n+\Delta i,\Omega+\Delta i],n}) \end{bmatrix}$$

Representando graficamente os valores da primeira linha da matriz no eixo das abcissas em metros, e os valores da segunda linha da matriz no eixo das ordenadas em nanossegundos, obtém-se o conjunto de pontos que definem a base da primeira camada.

A aproximação deste conjunto de pontos através de uma aproximação matemática recorrendo à equação hiperbólica apresenta vários problemas, nomeadamente o facto de que a intersecção no eixo das ordenas é desconhecida, bem como o valor da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas nesta camada, uma vez que a sua constante dielétrica não é conhecida.

Deste modo, com duas incógnitas (t_0 e v) optou-se por realizar uma aproximação exponencial, recorrendo a uma linha de tendência aplicada aos pontos representativos da base da primeira camada.

Uma equação exponencial é uma equação na forma $y = ab^x$, onde a e b^x são parâmetros.

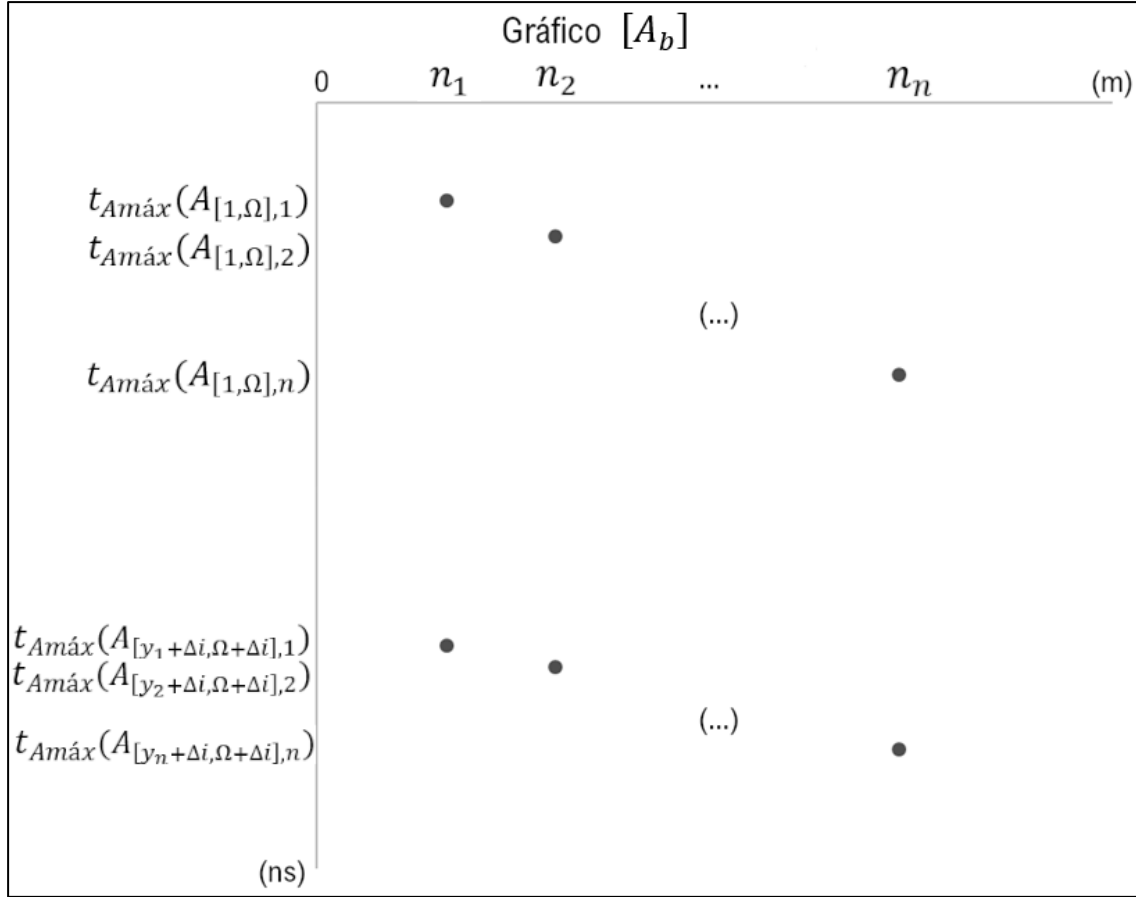


Figura 3.6- Gráfico tipo do conjunto de pontos representativos da primeira camada do pavimento.

Atribuindo o valor de x igual a zero a equação devolve o valor de intersecção no eixo das ordenadas que, de acordo com a notação utilizada no presente texto, é designado por t_0 . Portanto, rescrevendo a equação exponencial de acordo com a notação usada obtém-se a equação (3.7):

$$y = t_0 b^x \quad (3.7)$$

Conhecendo assim, através da linha de tendência exponencial, o valor de t_0 para o conjunto de pontos representativos da segunda interface, aplica-se na equação da hipérbole, substituindo as restantes incógnitas para o primeiro ponto deste conjunto, uma vez que este ponto apresenta a menor distancia ao eixo das ordenadas e a sua implicação no erro final deste processo de aproximação será o menor.

Deste modo $x = n_1$, $y = t_{Amáx}(A_{[y_1+\Delta i, \Omega+\Delta i], 1})$ e t_0 será o retirado da linha de tendência exponencial, ficando apenas como incógnita a velocidade de propagação da onda na camada de mistura betuminosa (S1).

$$\frac{(t_{Amáx}(A_{[y_1+\Delta i, \Omega+\Delta i], 1}))^2}{t_0^2} - \frac{n_1^2}{v^2 (t_{Amáx}(A_{[y_1+\Delta i, \Omega+\Delta i], 1}))^2} = 1$$

Este valor de velocidade em metros por nanossegundo caracteriza então a camada de mistura betuminosa do pavimento flexível. A partir de agora todos os dados necessários à determinação da espessura estão adquiridos, sendo o próximo passo a descrição do percurso das ondas na camada.

No caso particular onde as antenas emissora e recetora distam em zero metros entre elas, estas encontram-se exatamente no alinhamento vertical do ponto em estudo, portanto um diagrama do caminho percorrido pelas ondas eletromagnéticas é o apresentado na Figura 3.7.

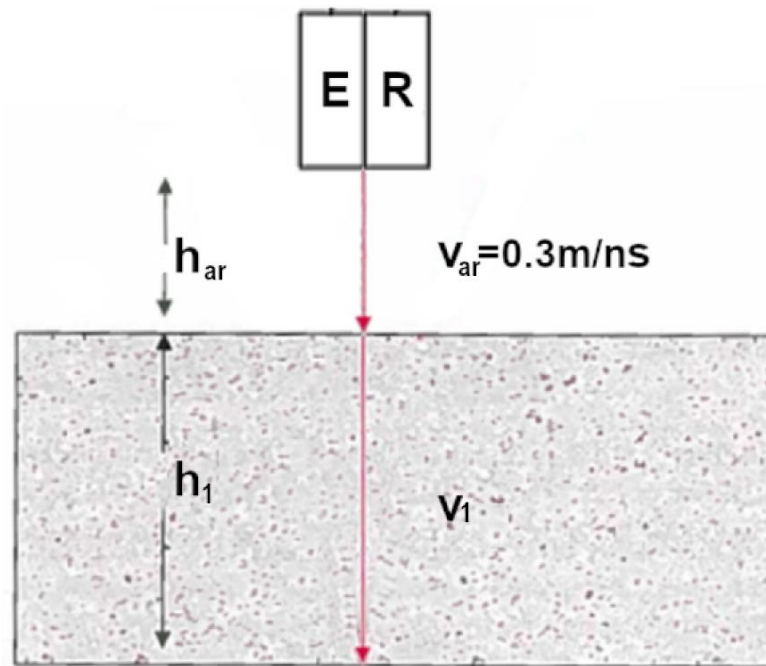


Figura 3.7– Diagrama do percurso das ondas eletromagnéticas quando $n=0$.

Onde:

- E – Antena emissora.
- R – Antena recetora.
- h_{ar} – A altura de das antenas à superfície do pavimento.
- v_{ar} – A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no ar.
- h_1 – A espessura da camada de mistura betuminosa.
- v_1 – Velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas na camada de mistura betuminosa.

Através da equação da velocidade, é conhecido que:

$$v = \frac{h_1}{\Delta t} \quad (3.8)$$

Reescrevendo em função de h_1 , ou seja, a espessura da camada obtemos:

$$h_1 = \frac{v\Delta t}{2} \quad (3.9)$$

O tempo percorrido é o intervalo de tempo onde a onda inicialmente atravessa a interface ar/S1, e volta a intercepar a interface S1/ar após ter sofrido reflexão na interface S1/S2, ver Figura 3.2.

É importante referir também que esta abordagem implica que h_1 seja o dobro da espessura uma vez que a onda percorre a camada do pavimento até à interface S1/ S2 e percorre de novo, o mesmo caminho, como resultado da reflexão, até à antena recetora.

Reestruturando a equação (3.9) acima para o caso de estudo deste trabalho obtemos:

$$h_1 = \frac{v(t_{Am\acute{a}x}(A1_{[y_1+\Delta i,t+\Delta i]}) - t_{Am\acute{a}x}(A1_{[1,t]}))}{2} \quad (3.10)$$

Onde os valores de tempo usados são os do caso ondes as antenas se encontram mais próximas entre si, ou seja, n_1 .

A metodologia de análise de dados desenvolvida pode ser resumida de forma visual no fluxograma apresentado na Figura 3.8, , englobando todos os passos descritos no presente subcapítulo até ao objetivo final, determinação da espessura da camada de mistura betuminosa do pavimento flexível.



Figura 3.8 – Fluxograma da metodologia de análise desenvolvida.

3.4. Considerações Finais

Ao longo deste capítulo foi desenvolvido em detalhe um método de interpretação de dados analítico que permite ao utilizador processar dados de Radar provenientes da realização em

campo de ensaios CMP-AC, sendo o processo apresentado de modo programado e num conjunto de passos sequenciais.

A metodologia de análise proposta é então a apresentada na Figura 3.9, onde através da realização de várias medições, com diferentes afastamentos entre antenas, e aplicação de um novo processo de análise de dados é eliminada a necessidade de extração de carotes, uma vantagem em comparação com o tradicional método de ensaio com Radar, conforme descrito no capítulo 2.

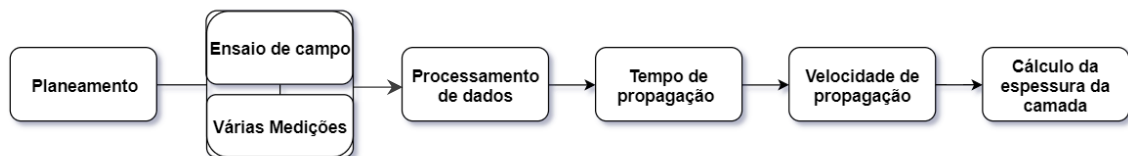


Figura 3.9 – Fluxograma da metodologia desenvolvida.

4. Calibração e implementação do novo método com ensaios em modelo físico

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo, são apresentados os ensaios de modelo físico e analisados os dados recolhidos, são também feitas comparações de precisão do método com carotes.

São apresentadas algumas sugestões e boas práticas de realização de ensaios com Radar, de modo a permitir uma recolha de dados fiáveis, que abrangem desde estabilidade de sinal até à escolha da frequência das ondas eletromagnéticas emitidas em função do objetivo do estudo.

4.2. Procedimento de ensaio

De modo a validar a nova metodologia de análise de dados de Radar, um conjunto de dados medidos em modelo físico à escala real foram utilizados para testar hipóteses e permitir a calibração do método.

Os dados de modelo físico foram obtidos através de uma campanha de ensaios previamente realizada no LNEC, em 2016, onde três modelos à escala real, representativos de estruturas tipo de pavimentos flexíveis, foram construídos em condições controladas.

Os três modelos apresentam uma área em planta de 8 m² cada, (2,00 m por 4,00 m) e 2,60 m de profundidade, sendo todos compostos por 3 camadas, S1/S2/S3, com várias espessuras.

- S1 é a camada de mistura betuminosa composta por agregado britado e betume 50/70.
- S2 é uma camada base composta por agregado britado de granulometria extensa em calcário.
- S3 é a camada de fundação.

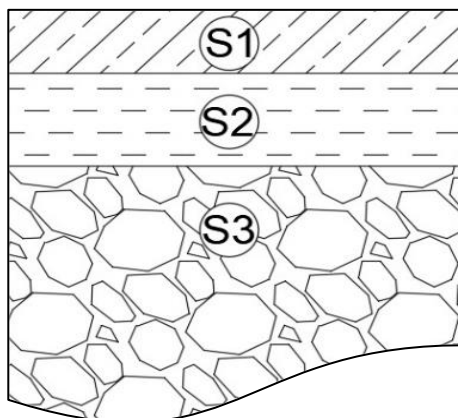


Figura 4.1– Representação das camadas do modelo físico.

Foram realizados cinco testes com o Radar (ver fig 4.2) em modelo físico, quatro estacionários e um em contínuo. A Tabela 4.1 apresenta as espessuras de projeto de cada um dos modelos físicos e as espessuras medidas (com recurso a carotes extraídas no ponto de cada ensaio).

A designação de estacionário prende-se com o facto de o Radar ter sido colocado sobre um ponto do pavimento e realizada uma leitura, alterada a posição das antenas, sem deslocar o equipamento, e realizada nova medição e assim sucessivamente.

Os quatro testes estacionários foram designados teste A, B1, B2 e C.

O teste D designado como em contínuo, foi realizado para verificar a adaptabilidade do método a ensaios de campo. O Radar percorre o alinhamento D em andamento com três afastamentos diferentes entre antenas, em três percursos consecutivos, foi sempre analisado o mesmo ponto.

Tabela 4.1 - Espessura da camada S1 nos ensaios realizados

Ensaio	Tipo de Medição	Tipo de Análise	Espessura de projeto da camada (m)	Espessura medida da camada (carotes) (m)
A	estacionária	pontual	0,14	0,135
B1	estacionária	pontual	0,06	0,067
B2	estacionária	pontual	0,06	0,053
C	estacionária	pontual	0,12	0,117
D	em contínuo	pontual	0,14	0,135



Figura 4.2– Antenas de Radar utilizadas.

Ao longo de todos os ensaios de modelo físico foi utilizado o equipamento Radar composto por um par de antenas suspensas, acopladas a um reboque de modo a permitir o manuseamento do sistema ao longo do ensaio, em andamento, e movimentação entre os diferentes pontos de ensaio estacionários.

Como referido anteriormente, os ensaios de modelo físico foram realizados em duas fases, estacionária e em contínuo. Relativamente aos ensaios estacionários, estes foram realizados em três pavimentos de espessuras distintas (0,14 m para o ensaio A; 0,06 m para os ensaios B1 e B2 e 0,12 m para o ensaio C) conforme apresentado na Tabela 4.1.

Foram feitas várias leituras do mesmo ponto de ensaio em cada um dos pavimentos (A, B1, B2, C) sendo o afastamento inicial entre antenas, emissora (E) e recetora (R), de 34 cm e o final de 100 cm sendo incrementado de 2 em 2 cm, estando as antenas suspensas ao longo de todo o ensaio a uma altura constante de 45 cm acima do solo.

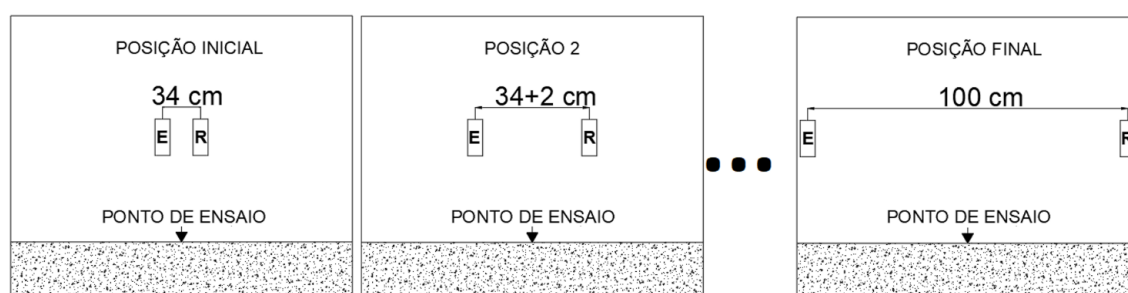


Figura 4.3– Diagrama do afastamento das antenas nos ensaios de modelo físico estacionário (A,B1,B2 e C).

Nestes ensaios, foram registadas 256 medições em cada ponto numa janela temporal de 12 ns, em cada afastamento singular de antenas. A frequência da antena utilizada foi de 1,8 GHz.

Com este teste pretende-se obter uma densidade maior de dados para melhor compreender o pavimento em análise e calibrar os processos e metodologias de cálculo desenvolvidas nesta dissertação, já apresentadas no capítulo 3.

Os ensaios em contínuo foram realizados com três afastamentos diferentes, entre a antena recetora (R) e a emissora (E), nomeadamente de 28 cm, 69 cm e 97 cm.

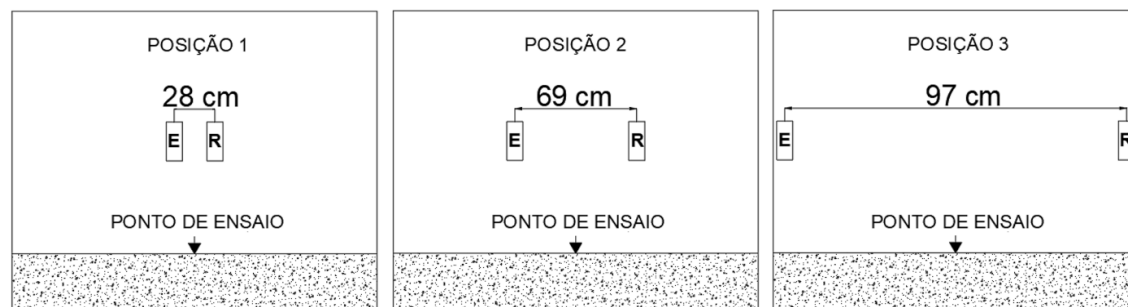


Figura 4.4- Diagrama do afastamento das antenas no ensaio em contínuo de modelo físico (D).

As características de medição foram as mesmas, sendo registadas as mesmas 256 medições numa janela temporal de 12 ns, com cada afastamento singular de antenas e em cada ponto de medição, sendo a frequência utilizada de 1,8 GHz.

Neste ensaio foram realizados um conjunto de três afastamentos de antenas com o propósito de testar as teorias concebidas no ensaio estacionário e extrapolá-las a um caso mais próximo de ensaios de campo.

Foram assim validados os resultados no caso de uma recolha de dados mais realista a ser implementada em campo, nomeadamente de três afastamentos, verificando se os princípios aplicados continuam a devolver valores de espessura da camada de mistura betuminosa aceitáveis.

4.3. Análise de dados

Aplicando o método desenvolvido aos ensaios estacionários, é criada a matriz [A] relativa ao conjunto de dados brutos recolhidos, sendo as representações gráficas apresentadas na Figura 4.5.

No eixo das ordenadas encontram-se os valores de afastamento das antenas de 0,34 a 1,0 m, e no eixo das abcissas o intervalo temporal de todas as leituras, em nanossegundos.

Tabela 4.2 – Matriz [A] gerada para o ensaio A - versão resumida.

Tempo	0,34	0,36	0,38	0,4	0,42	...	0,98	1	(m)
0,04	0	0	0	0	0		0	0	
0,09	0	0	0	0	0		0	0	
0,14	-48	-375	-128	-166	-241		-13	51	
0,18	221	-301	41	-108	-212		-99	2	
0,23	422	-69	267	35	-157		-117	-25	
0,28	479	152	503	225	-60		-104	18	
0,32	371	322	653	357	18		-23	72	
0,37	244	497	682	411	133		69	45	
0,42	185	611	656	520	306		161	8	
0,46	220	765	597	606	499		207	61	
0,51	345	867	572	700	676		258	182	
0,56	412	863	536	732	776		299	65	
0,60	315	676	501	706	762		316	-135	
....									
11,90	-362	-388	-249	-375	-755		363	315	
11,95	-313	-300	-297	-396	-757		340	518	
12,00	-233	-230	-353	-414	-589		391	534	
(ns)									

Para facilitar a apresentação dos dados são referenciados no texto dados numéricos apenas relativos ao ensaio A, e de modo simplificado, dada a dimensão das matrizes geradas, sendo, contudo, apresentados exemplos gráficos de todos os ensaios estacionários e respetivos resultados da análise.

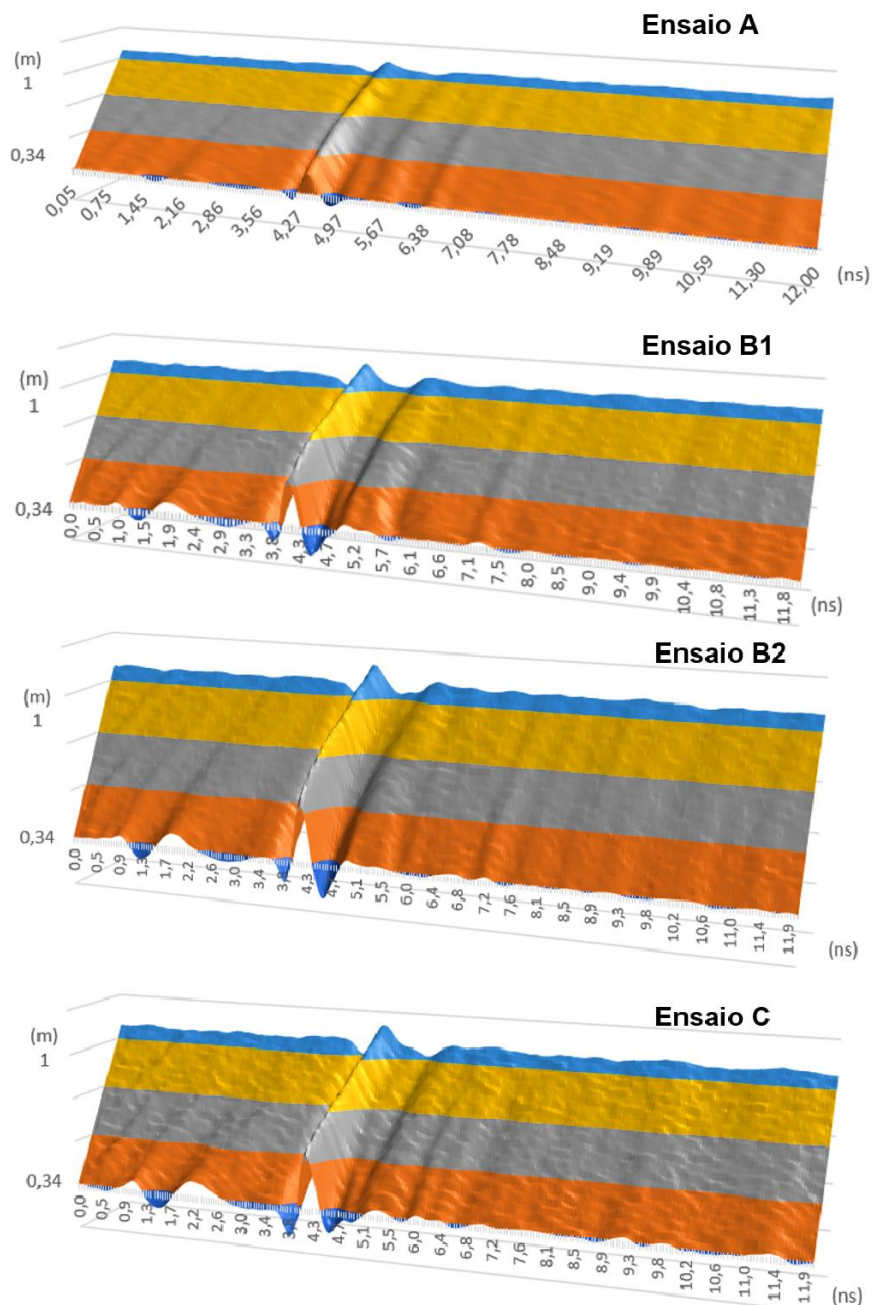


Figura 4.5— Representação gráfica das leituras dos ensaios A, B1, B2 e C.

Observando a Figura 4.5 é possível claramente identificar uma zona de pico em cada representação gráfica das matrizes $[A]$ de cada ensaio A, B1, B2 e C.

Este conjunto de picos (no caso do ensaio A situado aproximadamente nos 4,27 ns), representa a interface camada de ar/superfície do pavimento, isolando estes valores máximos e criando gráfico de dispersão relativos à matriz $[A_{sp}]$ obtém-se os gráficos apresentados na Figura 4.6.

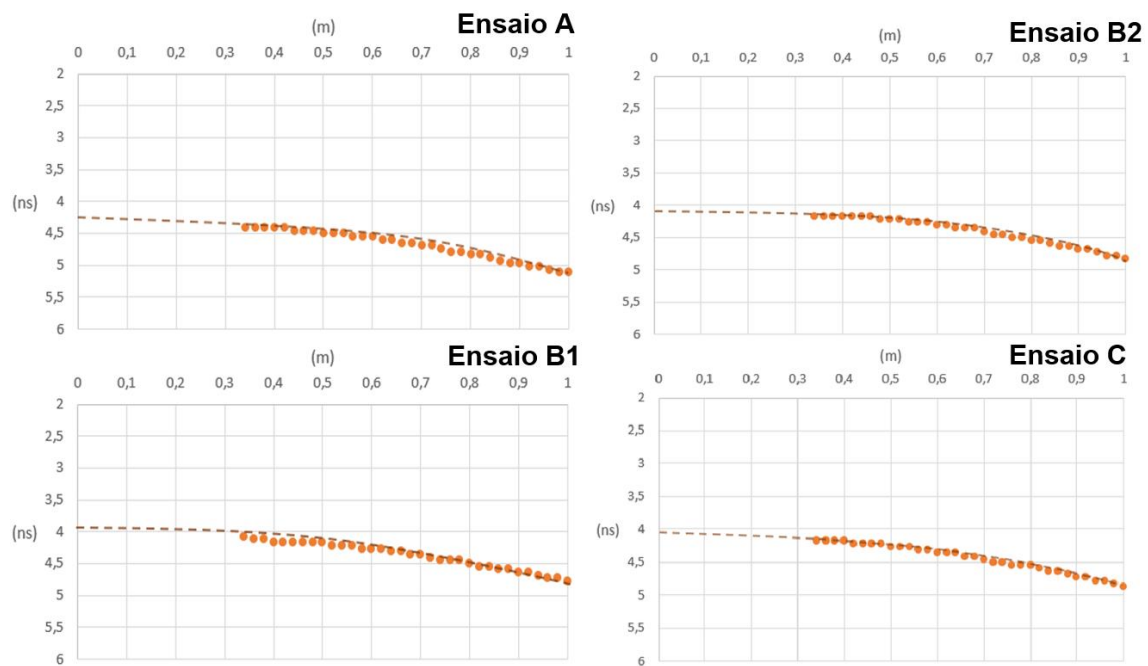


Figura 4.6– Pontos representativos da superfície do pavimento para cada ensaio.

Aproximando uma hipérbole a cada conjunto de pontos de cada ensaio e medindo o erro através do afastamento entre o valor da ordenada do ponto original e o valor da ordenada do ponto criado pela hipérbole, ambos com a mesma abscissa, obtemos para várias equações de hipérbole um gráfico de erro apresentado na Figura 4.7.

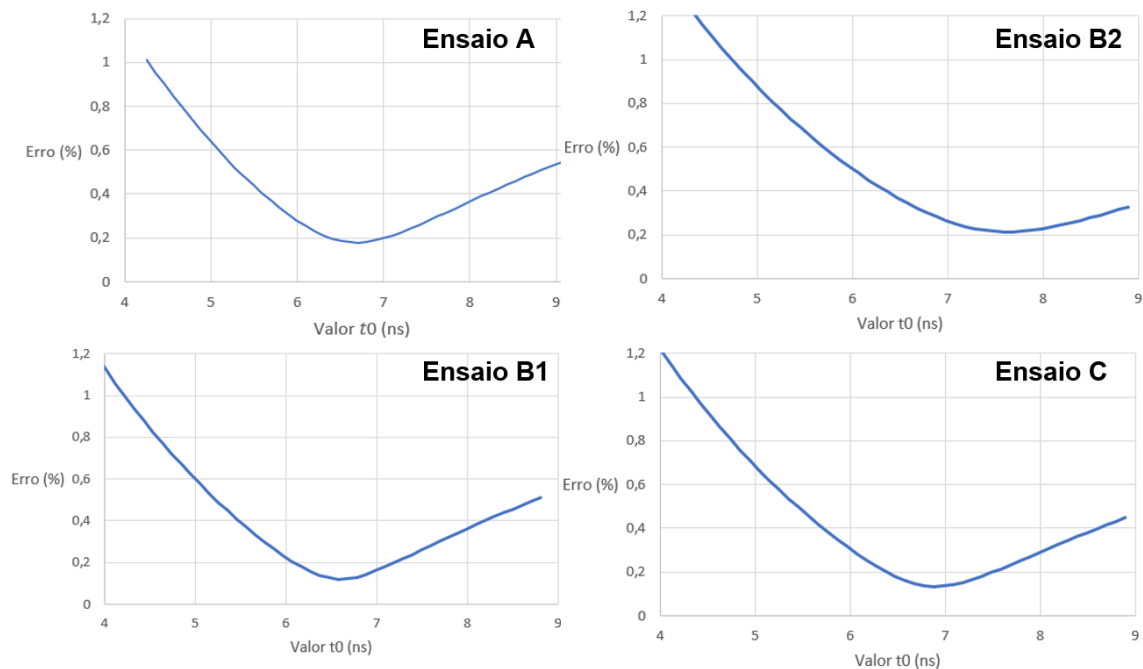


Figura 4.7– Gráfico do erro da hipérbole aproximada em relação ao seu valor t_0 para os ensaios A, B1, B2 e C.

Por fim, após a seleção do valor t_0 que retorna o menor erro, é necessário identificar e isolar os pontos de pico correspondentes à interface das camadas S1 e S2, de modo lógico este pico será o maior valor subsequente ao pico inicial.

De notar que no caso do ensaio A, como a espessura é de 14 cm, a execução da camada em misturas betuminosas foi realizada em duas camadas, compactadas separadamente. Assim, foi analisado o terceiro pico e não o segundo, como no caso dos modelos físicos B1 B2 e C. Na Figura 4.5, é possível identificar duas reflexões da onda, uma na interface entre as camadas em misturas betuminosas cujo pico é possível observar em torno de 5,67 ns e outra na base das camadas betuminosas, com o pico em torno de 6,38 ns.

Selecionado este conjunto de pontos e aplicando a correção de tempo Δt é então possível criar o conjunto de gráficos, ver Figura 4.8, onde se representam os pontos relativos à superfície do pavimento e os pontos relativos ao fim da camada S1 para cada ensaio.

Aproximando o conjunto dos pontos da base do pavimento através de uma exponencial obtemos o valor de intersecção no eixo das ordenadas de cada ensaio.

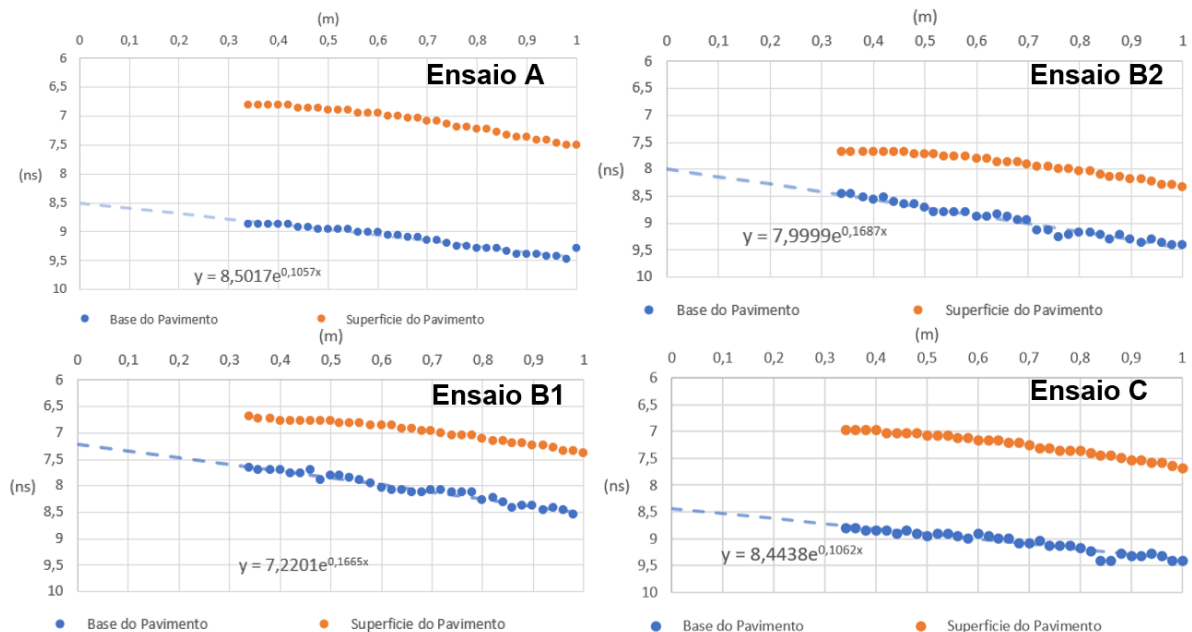


Figura 4.8– Conjunto de pontos referentes à superfície e à base da camada S1.

Através do valor de t_0 de respetivamente 8,5017; 7,2201; 7,9999 e 8,4438 ns para os ensaios A, B1, B2 e C, respetivamente, determina-se a velocidade propagação das ondas eletromagnéticas dentro do material S1 para cada ensaio, de acordo com a equação (3.5), apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas na camada superficial nos vários ensaios.

Ensaio	Velocidade de propagação Camada S1 (m/ns)
A	0,129
B1	0,125
B2	0,116
C	0,131

O processo de ensaio previamente descrito foi então aplicado ao caso de estudo D, contudo a sua análise apresenta algumas diferenças devido ao número significativamente menor de posições das antenas, de 34 para apenas três.

O gráfico das amplitudes ao longo do tempo das três leituras é apresentado na Figura 4.9.

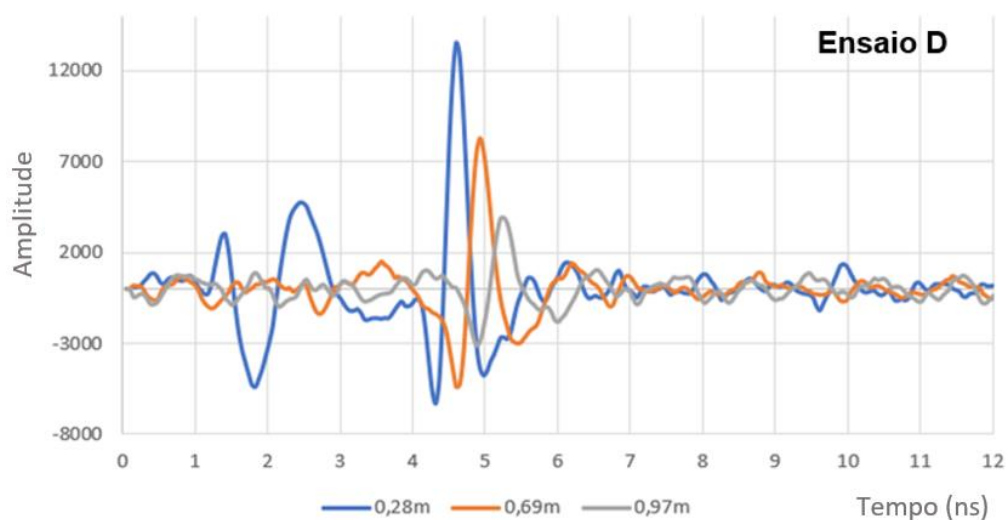


Figura 4.9– Representação gráfica das leituras do ensaio D.

Neste ensaio, mesmo com uma menor variação de distância entre antenas, as zonas de picos são claramente identificáveis num gráfico.

Embora este facto torne a análise visual mais fácil, na fase seguinte, a aproximação da hipérbole está consideravelmente mais dependente de uma recolha de dados precisa, de modo a não originar desvios significativos.

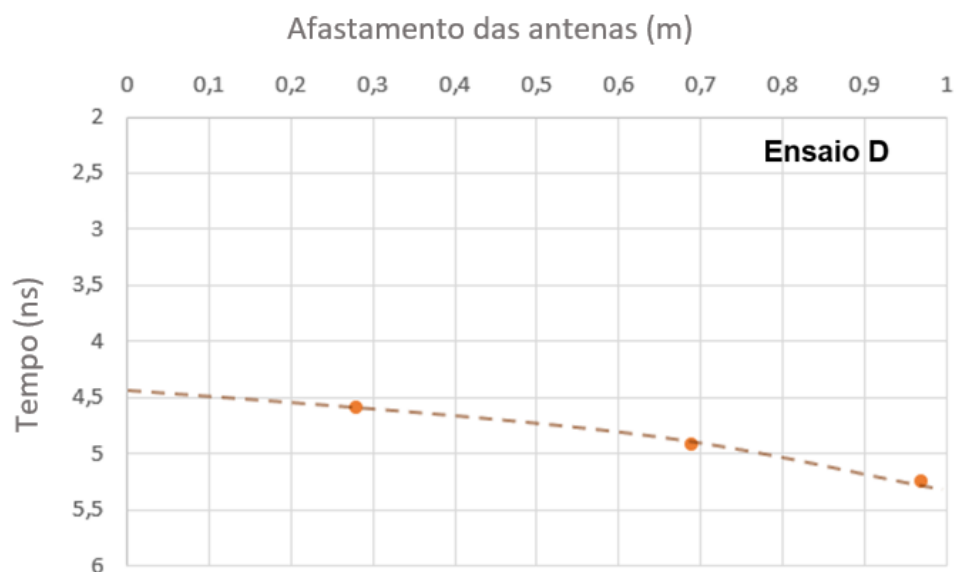


Figura 4.10– Pontos representativos da superfície do pavimento para o ensaio D.

De modo similar ao anteriormente aplicado nos casos A, B1, B2 e C é aproximado um conjunto de hipérboles aos pontos representativos de cada pico (Figura 4.10) e medido o erro entre os pontos das várias hipérboles geradas e os pontos reais (Figura 4.11) e selecionado o valor t_0 que retorna o menor erro.

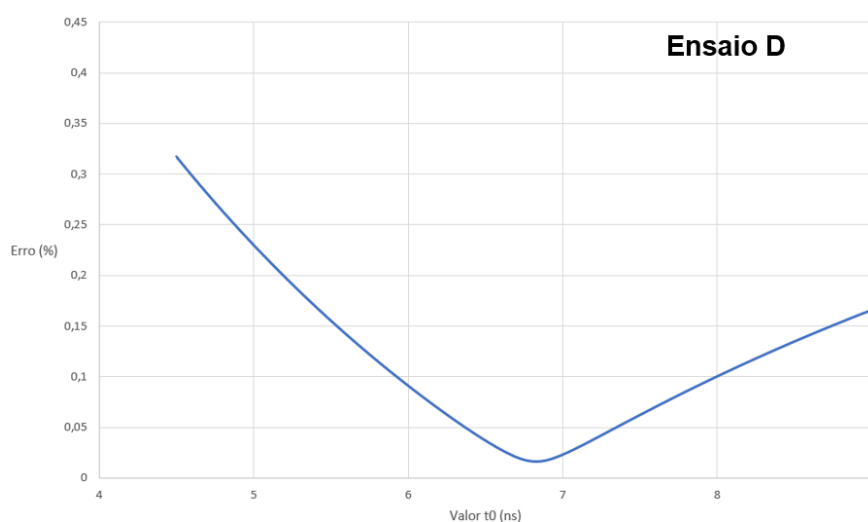


Figura 4.11– Gráfico do erro da hipérbole aproximada por valor t_0 no ensaio D.

Com a superfície do pavimento definida é então, de modo análogo ao realizado nos ensaios anteriores, aproximado os pontos representativos da base do pavimento a uma equação exponencial, devolvendo o valor de 8,8761 ns para t_0 na base do pavimento no ensaio D.

Pela equação (3.5), pode-se então estimar a velocidade propagação das ondas eletromagnéticas dentro do material S1 de 0,124 m/ns.

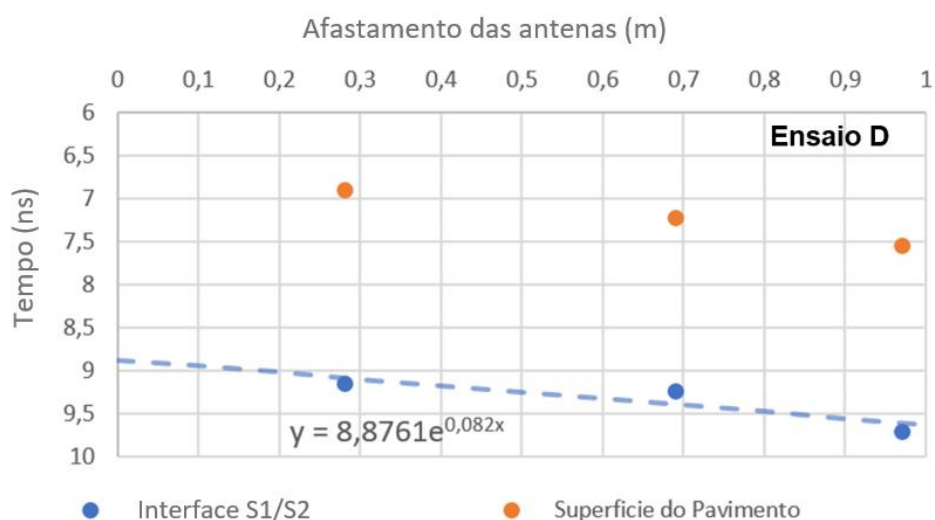


Figura 4.12– Conjunto de pontos referentes à camada S1.

Com o conhecimento das velocidades de propagação na primeira camada do pavimento flexível de todos os ensaios de modelo físico é então possível, através da equação (3.9), estimar a espessura da camada S1.

Uma vez que ao longo do método desenvolvido o primeiro ponto de pico relativo ao menor afastamento de antenas é o utilizado para a aproximação, tanto das equações hiperbólica como para a exponencial, este ponto tanto para a superfície da camada como para a base será utilizado para a definição do intervalo de tempo que a onda percorre na camada.

Obviamente o valor de tempo será dividido por dois, uma vez que a onda percorre a camada numa direção é refletida na zona de interface e percorre de novo a camada até ao recetor de sinal.

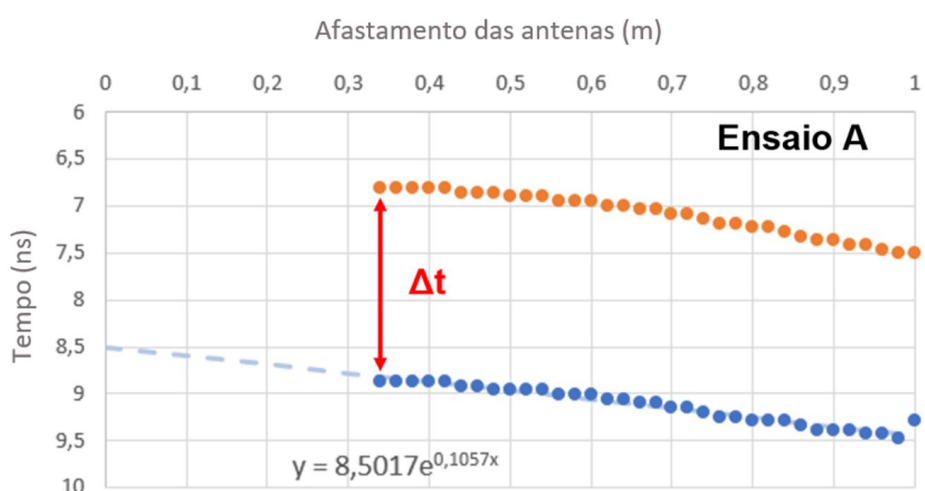


Figura 4.13– Representação do intervalo de tempo para o ensaio A.

Com a resolução destes passos é então estimada a espessura da camada S1 para o ensaio D, apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Valores das espessuras calculadas nos ensaios de modelo físico.

Ensaio	Espessura da camada S1 estimada CMP-AC (m)
A	0,133
B1	0,062
B2	0,046
C	0,120
D	0,141

4.4. Precisão de resultados

Ao longo deste subcapítulo são comparados os resultados dos ensaios de modelo físico com carotes realizadas nos exatos pontos de ensaio, bem como uma comparação com os valores obtidos nos mesmos pontos utilizando o método SRM.

Os valores obtidos para o método SRM foram retirados dos estudos já realizados no âmbito de uma tese de doutoramento no LNEC, (Marecos, 2018).

Na Tabela 4.5 apresenta-se a comparação de valores de espessura estimados nos ensaios de modelo físico com os valores medidos nas carotes.

De seguida, são calculadas as percentagens de erro obtidas em cada ensaio, de acordo com as equações (4.1) e (4.2), para o método SRM e CMP-AC, respetivamente, as quais se apresentam na Tabela 4.6.

$$erro (\%) = \frac{(h_{1SRM} - h_{1carotes}) * 100}{h_{1carotes}} \quad (4.1)$$

$$erro (\%) = \frac{(h_{1CMP-AC} - h_{1carotes}) * 100}{h_{1carotes}} \quad (4.2)$$

Tabela 4.5 – Comparação dos valores de espessura SRM, CMP-AC e carotes nos ensaios de modelo físico.

Ensaio	Espessura medida (m)	Espessura estimada (m)	
	Carotes	SRM	CMP-AC
A	0,135	0,141	0,133
B1	0,064	0,071	0,062
B2	0,053	0,067	0,046
C	0,117	0,114	0,120
D	0,135	0,141	0,141

Tabela 4.6 - Valores da diferença e percentagem de erro nos ensaios de modelo físico.

Ensaio	Δ (m)		Erro (%)	
	SRM	CMP-AC	SRM	CMP-AC
A	+0,006	-0,002	4,44	1,48
B1	+0,007	-0,002	10,94	3,13
B2	+0,014	-0,007	26,41	13,21
C	-0,003	+0,003	2,56	2,56
D	+0,006	+0,006	4,44	4,44

O erro absoluto obtido varia entre 2 e 7 mm para o novo método analítico CMP-AC, e entre 3 e 14 mm para o SRM, respetivamente.

Para o novo método analítico CMP-AC, todos os pontos apresentam valores de erro inferiores a 5%, exceto no ponto do ensaio B2 que tem o maior valor percentual de erro, 13,21%. Ao observar os valores de desvio de espessura é possível concluir que embora o valor percentual seja superior a 10% em termos de variação de espessura apenas traduz um erro de 7 mm.

Na Figura 4.14 apresenta-se uma representação gráfica das espessuras medidas e estimadas para todos os ensaios de modelo físico.

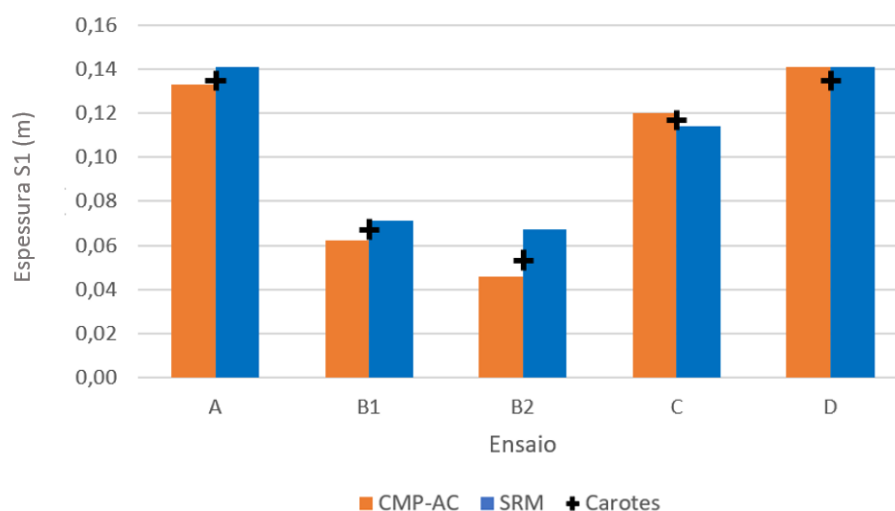


Figura 4.14 – Comparação das espessuras medidas em carotes e estimadas com o Radar pelos métodos SRM e CMP-AC analítico.

Analisando a distribuição de erros é possível reparar que o maior valor de erro ocorre na estrutura de pavimento onde a camada de mistura betuminosa tem menor espessura (B2). Recorde-se que nos ensaios de modelo físico foram registadas apenas 256 impulsos em cada ponto de ensaio. Esta situação, aliada ao facto de que em menores espessuras a onda eletromagnética sofre reflexões em intervalos de tempo demasiado curtos (com poucos ns de intervalo), vai afetar a interpretação dos dados, não estando tão definidos os pontos onde a amplitude corresponde à atual reflexão da onda, sendo mais difícil para o utilizador a interpretação. O aumento do número de impulsos em cada medição deverá diminuir o erro associado.

Comparativamente ao método SRM, o processo de análise desenvolvido (CMP-AC) apresenta no global das medições uma maior precisão de resultados. Podendo-se afirmar que o método desenvolvido permite uma boa aproximação à realidade. Sendo validada esta metodologia de análise, prossegue-se com o seu teste para a fase de ensaios de campo.

4.5. Normas e procedimentos recomendados.

Atualmente não existe normalização no espaço europeu para a utilização do Radar na engenharia de pavimentos. No entanto, foram desenvolvidos alguns guias para a sua aplicação do Radar em pavimentos, dos quais se destacam as recomendações elaboradas no MaraNord Project para a utilização do Radar em projetos de reabilitação (Saarenketo & Maijala, 2011), medição do índice de vazios (Saarenketo, 2011), e controle de qualidade de construção de pavimentos (Saarenketo *et al.*, 2011) e o guia para avaliação de pavimentos flexíveis com Radar desenvolvido na Acção COST TU1208, (TU1208 GPR Association, 2017).

Nos Estados Unidos, a norma ASTM D4748-10 define a metodologia de ensaio para a determinação da espessura de camadas ligadas em pavimentos utilizando o Radar (ASTM D4748-10, 2012). Contudo, mesmo neste caso a norma apresenta variáveis que terão de ser definidas pelo utilizador aquando do planeamento do ensaio, função das especificidades de cada caso em análise. De seguida descreve-se de modo sucinto os procedimentos de planeamento de um ensaio com Radar, apresentando-se algumas recomendações para a aplicação do novo método desenvolvido.

Durante o planeamento do ensaio é necessário escolher a frequência da antena do Radar. Esta escolha vai depender da profundidade máxima e da precisão que é necessário medir. Conforme referido no capítulo 2, uma frequência mais elevada, está associada a um comprimento de onda mais curto, conduzindo a resultados com maior resolução, mas com a desvantagem de limitar a profundidade de prospeção. De modo inverso, uma onda com menor frequência, permite maiores profundidades, mas com menor resolução.

Na avaliação da espessura de pavimentos utilizam-se antenas suspensas, de forma a permitir a medição em contínuo à velocidade de tráfego. As frequências habituais para este tipo de aplicação situam-se normalmente entre 1.0 GHz a 2,0 GHz. De notar que os valores de frequências indicados correspondem a um valor central, sendo que a onda é emitida num espectro de frequência em torno deste valor central.

A Tabela 4.7 apresenta os valores de referência para a profundidade e resolução para algumas das frequências mais comuns.

Tabela 4.7 – Valores guia para escolha de valores de frequência (ASTM D4748-10, 2012)

Frequência (GHz)	Profundidade Máxima (m)	Resolução (mm)	Precisão (mm)
1,0	1,00	40	± 5,0
2,0	0,40	25	± 2,5

Importa no entanto referir que, os valores apresentados na Tabela 4.7 podem variar dependendo de diversos fatores, como sendo a percentagem de água, o volume de vazios, ou mesmo a constituição da própria mistura betuminosa.

Para a medição da espessura da camada de mistura betuminosa de um pavimento flexível, recomenda-se a utilização de uma antena suspensa com uma frequência central próxima de 2,0 GHz. Esta frequência vai permitir a aquisição de dados com uma melhor resolução numa profundidade máxima compatível com as espessuras habituais deste tipo de camadas (inferiores a 30 cm).

Sugere-se a escolha do número máximo de registos permitido pelo Radar para as configurações adotadas (por exemplo 1024 ou 2048), por forma a permitir uma maior definição dos picos das amplitudes de reflexão, em especial para camadas de misturas betuminosas mais finas.

Para a implementação do novo método de análise proposto, devem ser realizadas no mínimo três medições, com as mesmas configurações de aquisição, ao longo do mesmo alinhamento de ensaio, com as antenas em três posições de afastamento diferentes. A primeira posição deverá ser a mínima permitida pelo Radar e a posição máxima não deverá ultrapassar o limite de afastamento definido pelo fabricante. A posição intermédia não deverá ser muito próxima de nenhum dos extremos.

Como os três registos são feitos de forma independente é muito importante que haja uma correta referenciação dos pontos de medição quer longitudinal quer transversalmente. Para minimizar os erros de posicionamento transversal recomenda-se a utilização de guias de orientação durante a medição (por exemplo marcas rodoviárias longitudinais da via). No sentido longitudinal, sugere-se a marcação dos pontos de início e fim do alinhamento de ensaio com um elemento refletor de ondas eletromagnéticas (por exemplo uma fita autocolante metálica) por forma a permitir que durante o processamento possa ser corrigido algum desfasamento entre os diversos alinhamentos de ensaio.

Durante o ensaio recomenda-se que apenas se inicie a gravação dos dados 30 minutos após a ligação de todo o sistema de Radar. Esta recomendação prende-se com a oscilação das ondas eletromagnéticas que é muito acentuada nos primeiros 30 minutos de tempo de funcionamento, e que é responsável por uma variação dos picos de amplitude.

Um estudo publicado no decorrer da Ação COST TU1208 (Pajewski *et al.*, 2018) mediu a instabilidade de amplitude do sinal ao longo do tempo de funcionamento, conforme apresentado na Figura 4.15.

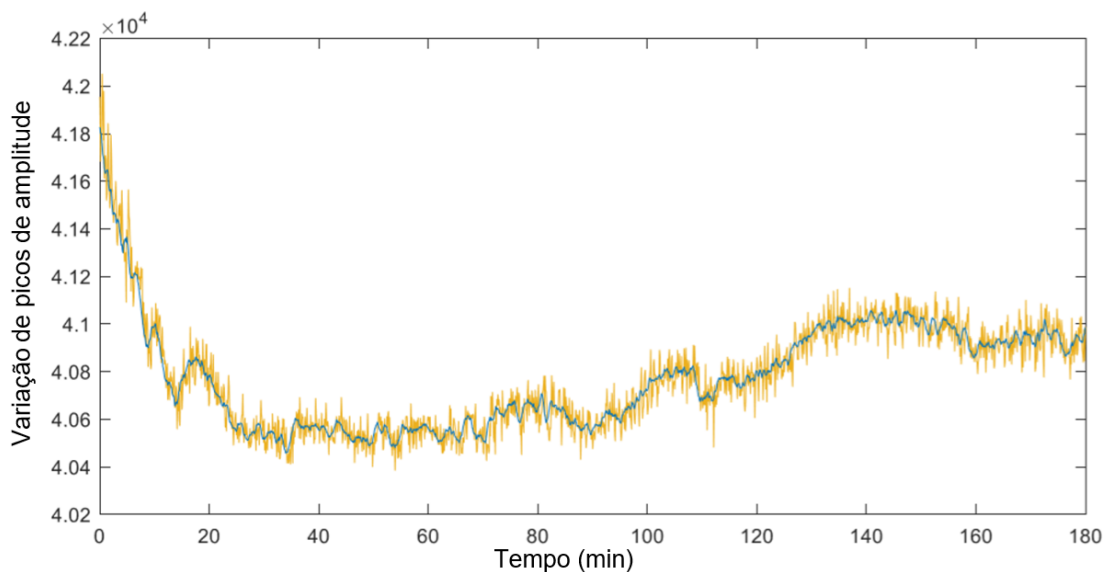


Figura 4.15 - Estabilidade da amplitude de ondas GPR em função do tempo, adaptado de (Pajewski *et al.*, 2018)

Por fim salientam-se alguns elementos que devem ser registados durante o ensaio e que complementam os dados de Radar recolhidos:

- Geo-referenciação dos pontos de início e fim do alinhamento de ensaio.
- Registo do sentido da medição dos dados.
- Registo das condições climatéricas durante o ensaio.
- Registo da distância ao solo das antenas.
- Registo dos afastamentos entre as antenas emissora e recetora em cada alinhamento de ensaio.
- Registo de alguma anomalia detetada superficialmente no pavimento.

4.6. Considerações Finais.

Ao longo deste capítulo foram analisados um conjunto de ensaios em modelo físico, realizados em ambientes controlados para testar e calibrar a metodologia desenvolvida no capítulo 3.

No fim deste capítulo são apresentadas várias sugestões de procedimentos de ensaio, com o objetivo de melhorar a qualidade dos dados recolhidos bem como facilitar a aplicação da metodologia CMP-AC em campo.

5. Aplicação do novo método em ensaios de campo

5.1. Considerações iniciais

O novo método de cálculo de espessuras, apresentado no Capítulo 3 e calibrado no Capítulo 4, foi aplicado para a sua validação em campo e condições reais, a um pavimento flexível, em serviço, para a estimação da espessura da camada de misturas betuminosas. O planeamento e a realização dos ensaios foi efetuada de acordo com as recomendações propostas em 4.5. Sendo um ensaio realizado em campo, não foram controlados quaisquer fatores externos, em analogia ao que acontece num ensaio real de um pavimento. A aplicação do novo método a um ensaio campo tem como objetivo avaliar a sua fiabilidade em situações reais de ensaio com menor controlo de variáveis.

É feita uma breve descrição do pavimento ensaiado e, de modo similar aos ensaios de modelo físico já apresentados, descreve-se o procedimento de ensaio e analisam-se os valores calculados da espessura, os quais são comparados com os valores obtidos pelos métodos tradicionais.

5.2. Descrição do pavimento flexível em estudo

O pavimento ensaiado é um pavimento flexível, em serviço. Os ensaios foram realizados na via exterior num troço longitudinal numa extensão 23,10 m. A via tem uma largura de 3,30 m e é delimitada na lateral exterior por um lancil (Figura 5.1).



Figura 5.1 – Pavimento ensaiado.

Não foi possível ter acesso ao projeto original do pavimento ensaiado, contudo, uma amostra que foi retirada após os trabalhos de reforço do pavimento, realizados em 2017, permitiu identificar duas camadas de mistura betuminosa distintas S1a e S1b (Figura 5.2) .

A camada S1a, com uma espessura de projeto de 5 cm, corresponde à camada de reforço, enquanto que a camada S1b corresponde a uma camada de misturas betuminosas antiga, com uma espessura média de 5 cm.

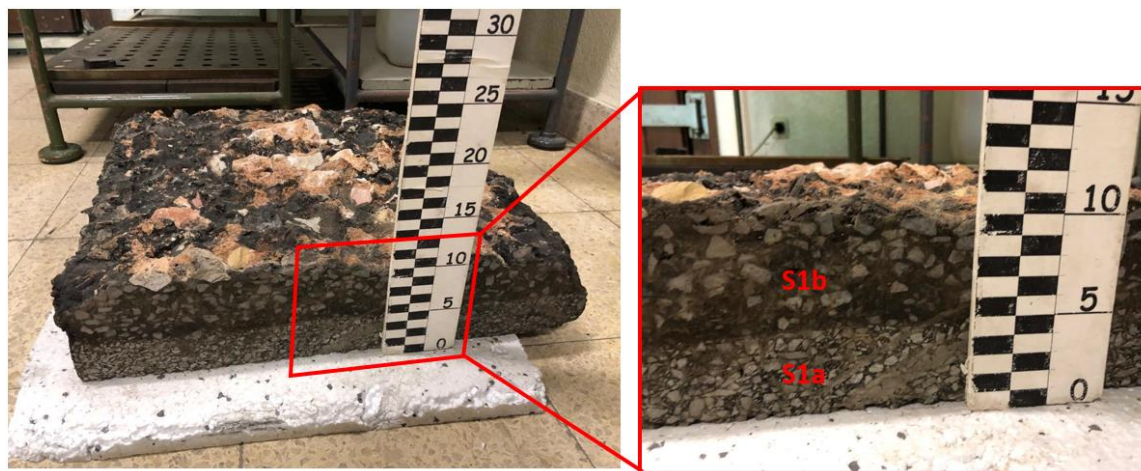


Figura 5.2 – Laje retirada do pavimento ensaiado após o reforço.

A Figura 5.3 apresenta uma representação esquemática da estrutura do pavimento ensaiado.

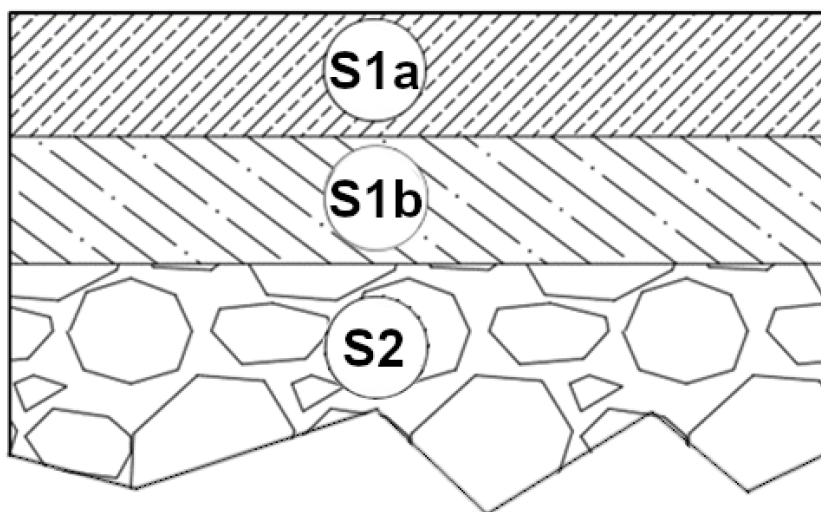


Figura 5.3- Representação esquemática da estrutura do pavimento ensaiado.

Na Figura 5.2 são ainda visíveis alguns agregados não ligados, que fazem parte da camada de base S2, não tendo no entanto informação da sua espessura. Recorda-se que esta camada está fora do âmbito deste estudo.

5.3. Ensaio com Radar

O ensaio foi realizado utilizando o Radar composto por um par de antenas suspensas, uma emissora e uma recetora, acopladas a um reboque de modo a permitir a medição em contínuo à velocidade de tráfego. As antenas usadas têm uma frequência central de 1,8 GHz.

O alinhamento de ensaio localiza-se a 1,75 m do lancil e tem a extensão de 23,10 m. Foi marcado com uma fita metálica a secção de início e de fim da via ensaiada. Apresenta-se na Figura 5.4 uma representação esquemática do posicionamento do veículo e do Radar durante o ensaio.

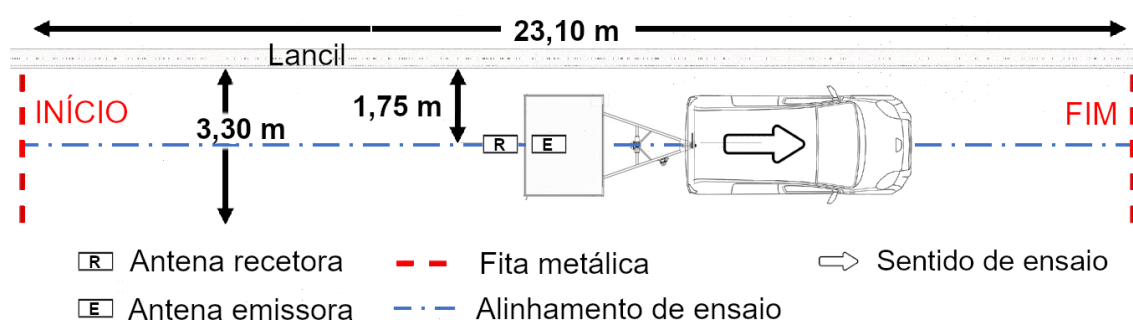


Figura 5.4 – Representação esquemática do alinhamento de ensaio com Radar.

Foram realizadas três passagens com afastamentos entre antenas emissora e recetora de 0,28; 0,68 e 1,00 m, respetivamente, sendo estes afastamentos constantes em cada passagem. O espaçamento entre pontos de ensaio foi de 0,10 m, tendo sido registados 1024 impulsos em cada ponto de ensaio, numa janela temporal de registo de 12 ns.

Durante as três passagens, as antenas encontravam-se suspensas a uma altura de 43,5 cm da superfície do pavimento.



Figura 5.5– Realização dos ensaios de campo.

5.4. Sondagens à rotação

Após a realização do ensaio de Radar foram realizadas sondagens à rotação (ensaio destrutivos) com o objetivo de estabelecer comparações e quantificar o erro da espessura estimada, comparando os resultados do novo método de análise com a espessura real medida nas carotes obtidas através das sondagens à rotação.



Figura 5.6 – Realização de sondagens de rotação no pavimento em estudo.

Foram extraídas um total de oito carotes em pontos de controle previamente selecionados ao longo do alinhamento de ensaio.

Na Figura 5.7 localizam-se os oito pontos de controle selecionados, referenciados através de um numero que indica a sua distância ao ponto de início dos ensaios, em metros. Deste modo, a carote designada por “C12” representa a carote extraída no ponto a 12 metros da linha de início do ensaio com Radar.

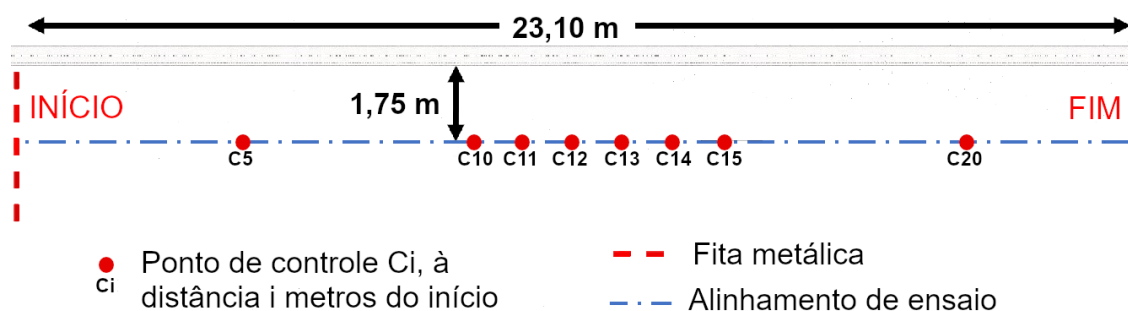


Figura 5.7 – Localização dos pontos de controle onde foram extraídas carotes.

5.5. Análise de dados de Radar

De modo a permitir uma análise mais completa do novo método desenvolvido, mantendo, contudo, um paralelismo com a aplicação em situações correntes de auscultação de pavimentos, os resultados dos ensaios com Radar, foram analisados em três abordagens distintas:

- Análise dos resultados obtidos nos pontos de controle previamente definidos.
- Análise de um ponto equivalente correspondente ao somatório das amplitudes de todos os pontos de ensaio num intervalo pré-definido.
- Análise de todos os pontos de ensaio num intervalo pré-definido.

Descreve-se em seguida, de forma sucinta, os procedimentos e os resultados obtidos em cada uma das diferentes abordagens. O ensaio de campo será designado por ensaio E.

Começando pela primeira abordagem, análise dos pontos de controle, é seguida a mesma metodologia utilizada nos ensaios de modelo físico. Para efeitos de demonstração da aplicação do novo método, é apresentado com detalhe o processo de cálculo para o ponto de controle C5, sendo os diagramas apresentados de seguida referentes a este ponto.

Na Figura 5.8, que representa a variação de amplitudes da onda refletida num ponto de ensaio para o menor afastamento das antenas, é facilmente identificável a amplitude correspondente à reflexão na superfície do pavimento. Não é, contudo, óbvia a identificação da interface entre as camadas de mistura betuminosa e granular.

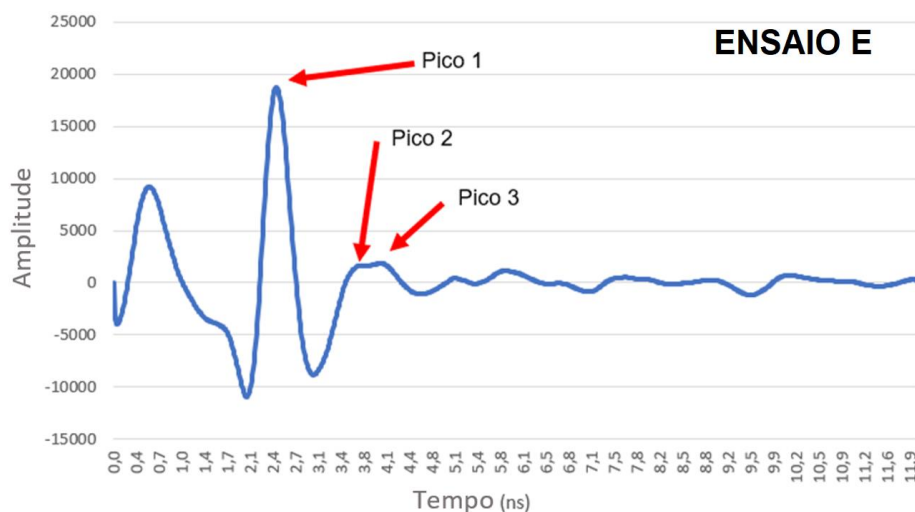


Figura 5.8– Gráfico de amplitudes de reflexão medidos com Radar num ponto de ensaio

Observando com maior detalhe a Figura 5.8 é possível indicar que o pico 1 representa a superfície do pavimento, o pico 2 a interface entre as camadas S1a e S1b e o pico 3 a interface entre a camada S1b e a camada S2.

O procedimento de identificação dos picos das interfaces foi replicado para cada uma das três medições realizadas com as diferentes posições de afastamento das antenas: 0,28; 0,68 e 1,00 m.

Na Figura 5.9 sobrepõem-se os gráficos de amplitudes, registados nas três medições. Com estas medições foi montada a matriz $[A]$ de dimensão 1024x3 com os respectivos valores de amplitude medidos para cada afastamento de antenas.

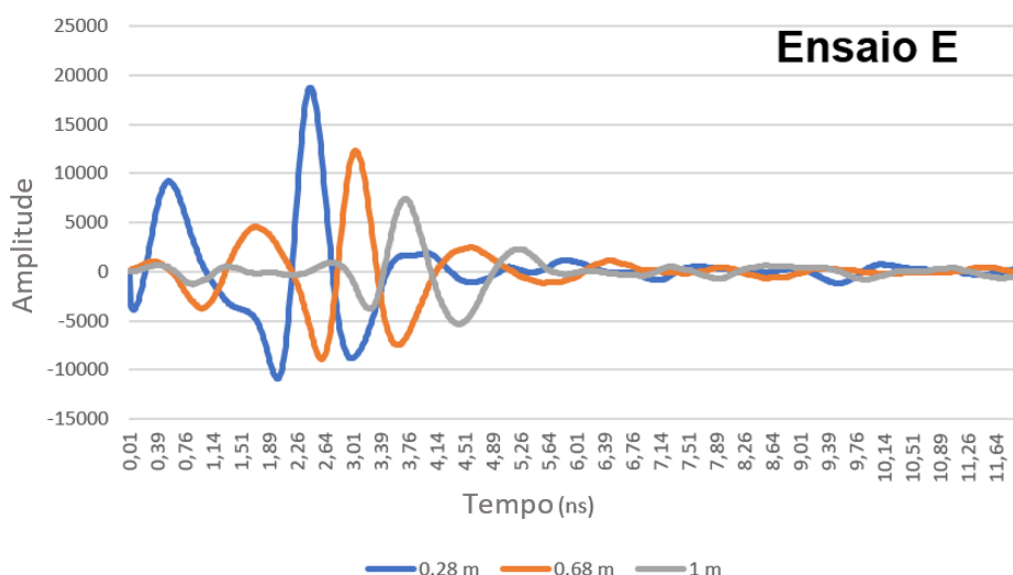


Figura 5.9 – Representação gráfica das leituras do Ensaio E no ponto de controle C5.

Foram identificados os picos referentes à reflexão da superfície do pavimento e foi montada a matriz $[A_{sp}]$ com as amplitudes do pico e o impulso temporal, correspondente. O gráfico dos pontos da matriz $[A_{sp}]$ é apresentado na Figura 5.10.

Com os pontos referentes à reflexão da superfície é definida uma hipérbole que se ajuste a esses pontos e é determinada a velocidade de propagação correspondente, a qual é comparada com c . Se os dois valores não coincidirem é indicativo de que o tempo zero teórico não está correto, sendo necessário proceder à sua correção.

Num processo iterativo, onde se faz uma translação dos valores das amplitudes ao longo do eixo dos tempos, são aproximadas várias hipérboles sendo o erro medido em cada iteração de acordo com a equação (3.6)

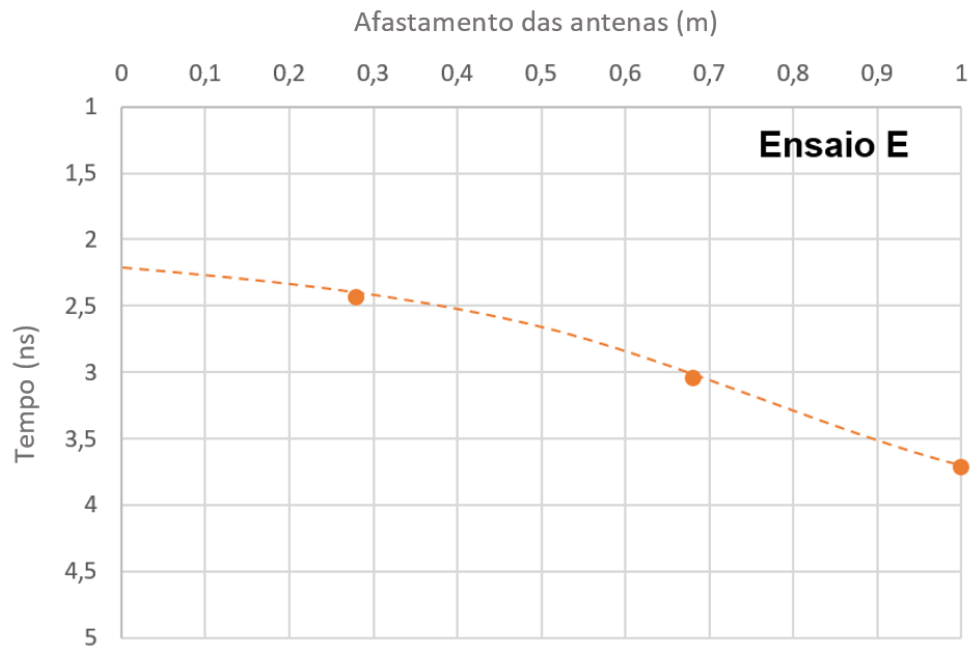


Figura 5.10 - Pontos representativos da superfície do pavimento para o ensaio E, no ponto de controle C5.

Escolhe-se como valor de tempo zero teórico aquele que é referente à hipérbole com menor erro de aproximação para a velocidade de c Figura 5.11, e fica assim definida a hipérbole representativa da superfície do pavimento, Figura 5.12.

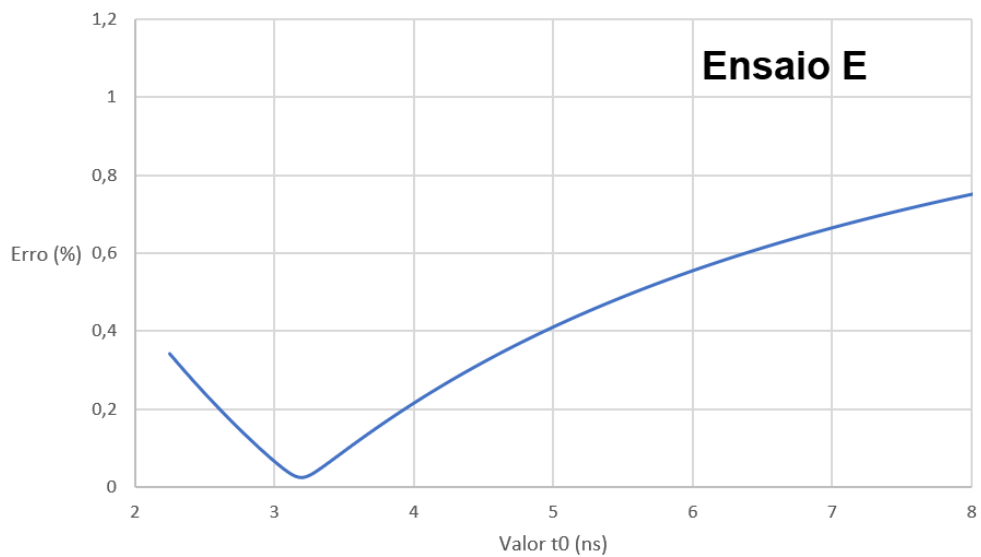


Figura 5.11 - Gráfico do erro da hipérbole aproximada por valor t_0 no ensaio E.

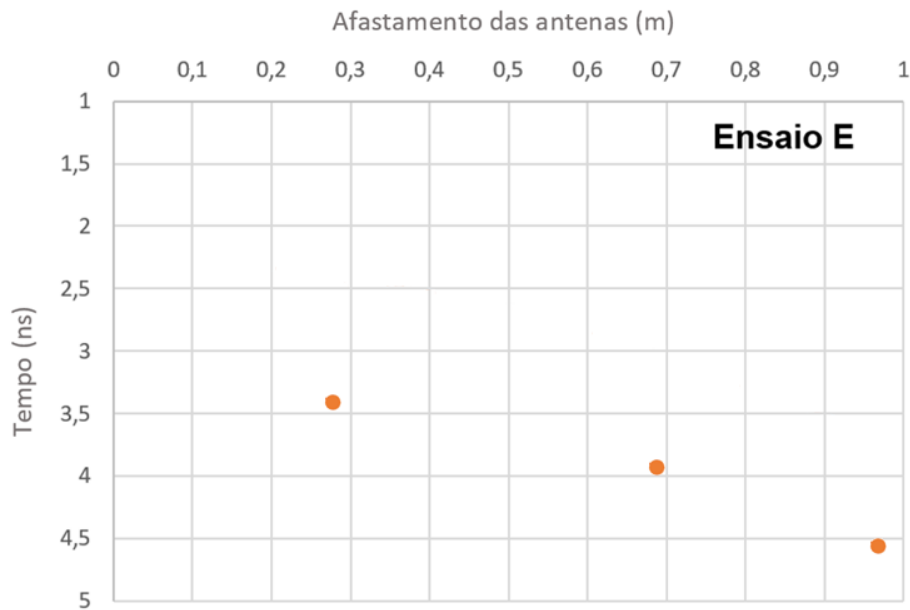


Figura 5.12 - Pontos representativos da superfície do pavimento para o ensaio E, no ponto de controle C5, após correção do tempo zero teórico.

De seguida, define-se a matriz $[A_c]$ aplicando à matriz $[A_{sp}]$ o valor do incremento Δi correspondente ao valor mínimo de erro.

Isolando agora os pontos referentes à interface S1b/S2, correspondentes à interface entre as camadas de misturas betuminosas e granular, é repetido o processo de aproximação, sendo agora utilizada, numa fase inicial, uma equação exponencial, Figura 5.13.

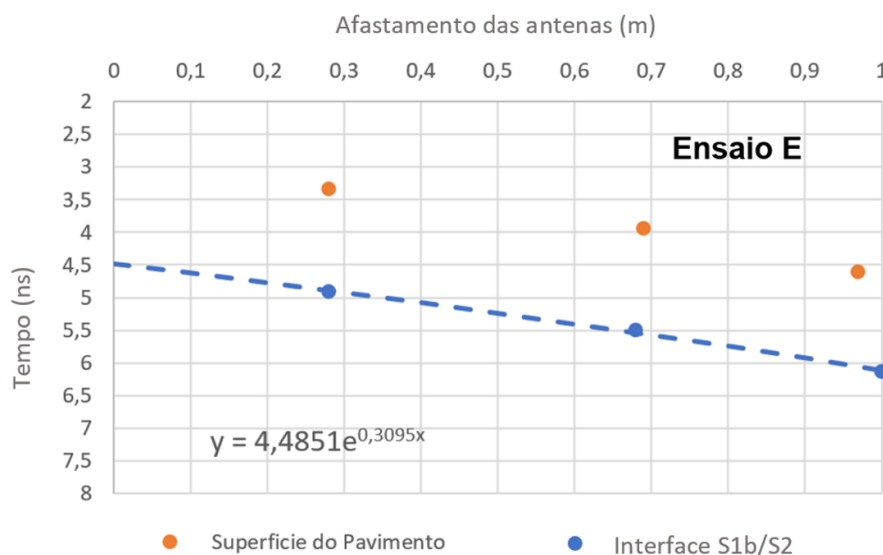


Figura 5.13 - Conjunto de pontos referentes à superfície da camada S1 e interface das camadas S1b com S2, no ponto de controle C5.

Com a aproximação exponencial determina-se o valor de t_0 para a reflexão na interface entre as camadas betuminosa e granular e, pela equação da hipérbole (3.5), calcula-se a velocidade de propagação para a posição de afastamento mínimo das antenas. Conhecendo a velocidade e o tempo de propagação da onda na camada de mistura betuminosa calcula-se a espessura da camada através da equação (3.9).

Na Tabela 5.1 apresentam-se as velocidades de propagação, os tempos de percurso e a espessura estimada da camada de misturas betuminosas (S1a+S1b) pelo método CMP-AC, para os oito pontos de controle

Tabela 5.1 – Velocidade de propagação e espessura estimada no ensaio E ao longo dos oito pontos de controle para o método CMP-AC.

Ponto de controle	Velocidade de propagação (m/ns)	Espessura estimada CMP-AC S1a+S1b (m)
C5	0,140	0,110
C10	0,139	0,103
C11	0,141	0,097
C12	0,142	0,110
C13	0,140	0,113
C14	0,142	0,114
C15	0,141	0,112
C20	0,139	0,091

Uma desvantagem de uma análise pontual é a não consideração da variabilidade das medições fora dos pontos de controle.

Tendo em consideração que os valores de amplitude são grandezas escalares, propõe-se, nesta segunda fase de análise, a consideração da soma das amplitudes medidas em todos os pontos num intervalo previamente definido. A dimensão do intervalo será definida pelo utilizador e vai depender do espaçamento dos pontos de medição, do tipo de análise que se pretende e da variabilidade da espessura da camada de mistura betuminosa esperada no alinhamento de ensaio.

Para a presente aplicação, escolheu-se um intervalo de cálculo de 5 m de acordo as zonas identificadas na Figura 5.14.

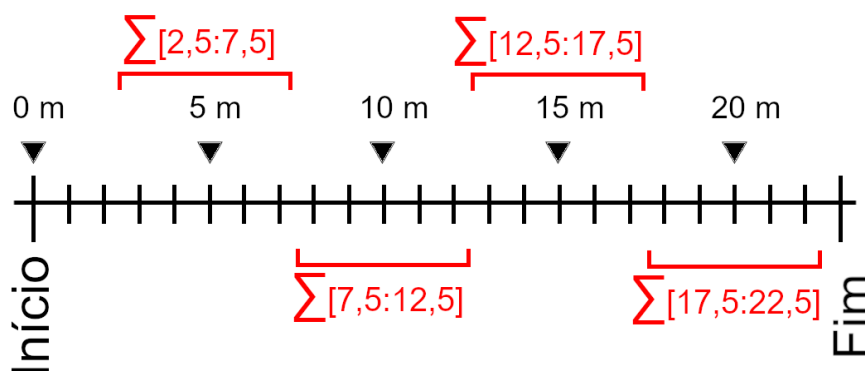


Figura 5.14 – Segunda abordagem de tratamento dos dados de ensaios de campo.

Esta abordagem, embora não calcule de forma direta nenhum valor correspondente a um ponto real do pavimento, determina uma espessura equivalente medida ao longo do intervalo de análise o que permite, por exemplo comprovar a coerência da interface num ou mais pontos intermédios.

Numa fase inicial são somados os diagramas de amplitudes correspondentes a cada um dos pontos do intervalo, obtendo-se o diagrama somatório de amplitudes, Figura 5.15.

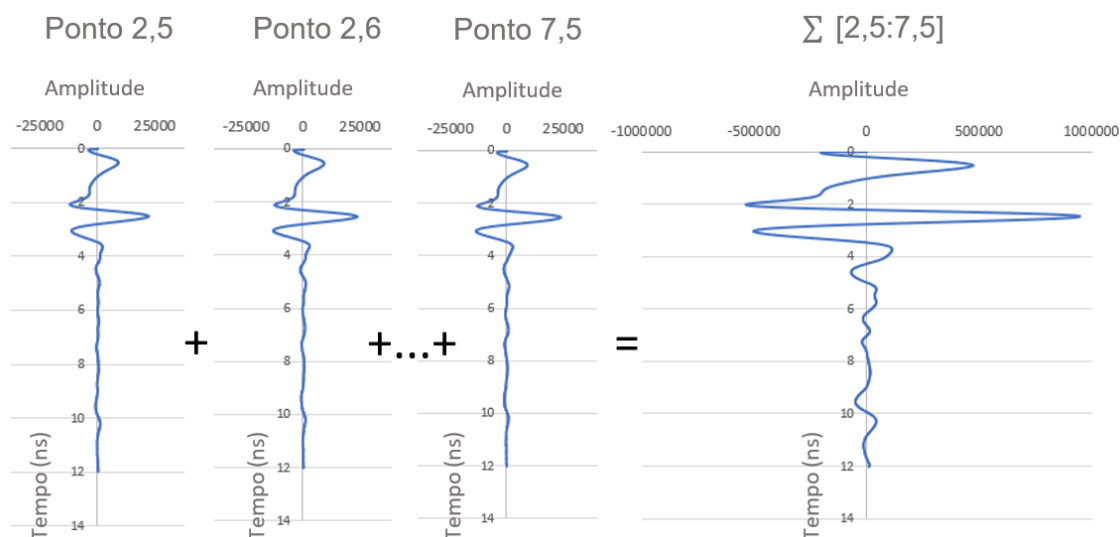


Figura 5.15 – Exemplo do processo de soma de amplitudes no intervalo de 2,5 a 7,5 m.

Findo este pré-processamento dos dados identificam-se os picos correspondentes à superfície do pavimento e à interface da camada de misturas betuminosas com a camada granular, para o ponto equivalente correspondente ao somatório de amplitudes.

Em seguida, calcula-se a velocidade de propagação e a espessura da camada de mistura betuminosa, de forma análoga à descrita para os pontos de controle.

Na Tabela 5.2 apresenta-se os resultados da aplicação desta abordagem para os quatro intervalos em análise.

Tabela 5.2 - Velocidade de propagação e espessura equivalente estimada no ensaio E ao longo dos quatro intervalos escolhidos, CMP-AC.

Intervalo (m)	Velocidade de propagação (m/ns)	Espessura S1a+S1b (m)
$\Sigma [2,5:7,5]$	0,141	0,095
$\Sigma [7,5:12,5]$	0,141	0,102
$\Sigma [12,5:17,5]$	0,142	0,113
$\Sigma [17,5:22,5]$	0,144	0,112

Esta abordagem permite a realização provisória de um despiste de zonas anómalas sendo posteriormente feita uma análise local, mais exaustiva, nas zonas que apresentem diferenças significativas de modo a tentar identificar a anomalia.

Por fim, na terceira fase do estudo são analisados todos os pontos medidos, num intervalo previamente selecionado, fornecendo um maior detalhe nos resultados de espessura obtidos. Apresenta-se de seguida os resultados no intervalo entre 10 e 15 m, correspondendo a um total de 50 pontos de ensaio espaçados de 10 cm entre si, permitindo uma análise contínua das variações de espessura.

Na Figura 5.16 apresenta-se as espessuras calculadas para o intervalo de 10 a 15 m, nos 50 pontos de medição, estes valores são também apresentados na Tabela 5.3.

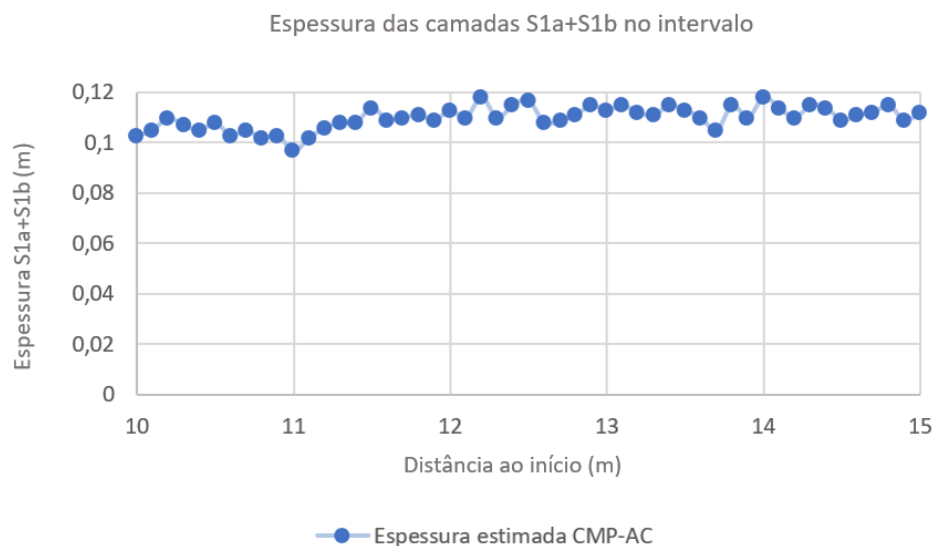


Figura 5.16 – Espessura estimada pelo método CMP-AC.

Tabela 5.3 – Espessura estimada de 10 em 10 cm no intervalo de 10 a 15 m.

Ponto (m)	Espessura S1a+S1b (m)	Ponto (m)	Espessura S1a+S1b (m)	Ponto (m)	Espessura S1a+S1b (m)
10,0	0,103	11,7	0,110	13,4	0,115
10,1	0,105	11,8	0,111	13,5	0,113
10,2	0,110	11,9	0,109	13,6	0,110
10,3	0,107	12,0	0,110	13,7	0,105
10,4	0,105	12,1	0,110	13,8	0,115
10,5	0,108	12,2	0,118	13,9	0,110
10,6	0,103	12,3	0,110	14,0	0,114
10,7	0,105	12,4	0,115	14,1	0,114
10,8	0,102	12,5	0,117	14,2	0,110
10,9	0,103	12,6	0,108	14,3	0,115
11,0	0,097	12,7	0,109	14,4	0,114
11,1	0,102	12,8	0,111	14,5	0,109
11,2	0,106	12,9	0,115	14,6	0,111
11,3	0,108	13,0	0,113	14,7	0,112
11,4	0,108	13,1	0,115	14,8	0,115
11,5	0,114	13,2	0,112	14,9	0,109
11,6	0,109	13,3	0,111	15,0	0,112

No caso do intervalo apresentado a média dos 50 valores estimados é 10,9 cm, com um desvio padrão de 4 mm.

5.6. Análise das carotes

A Figura 5.17 apresenta as carotes extraídas nos oito pontos de controle. Da figura é possível verificar uma uniformização da espessura das camadas betuminosas.

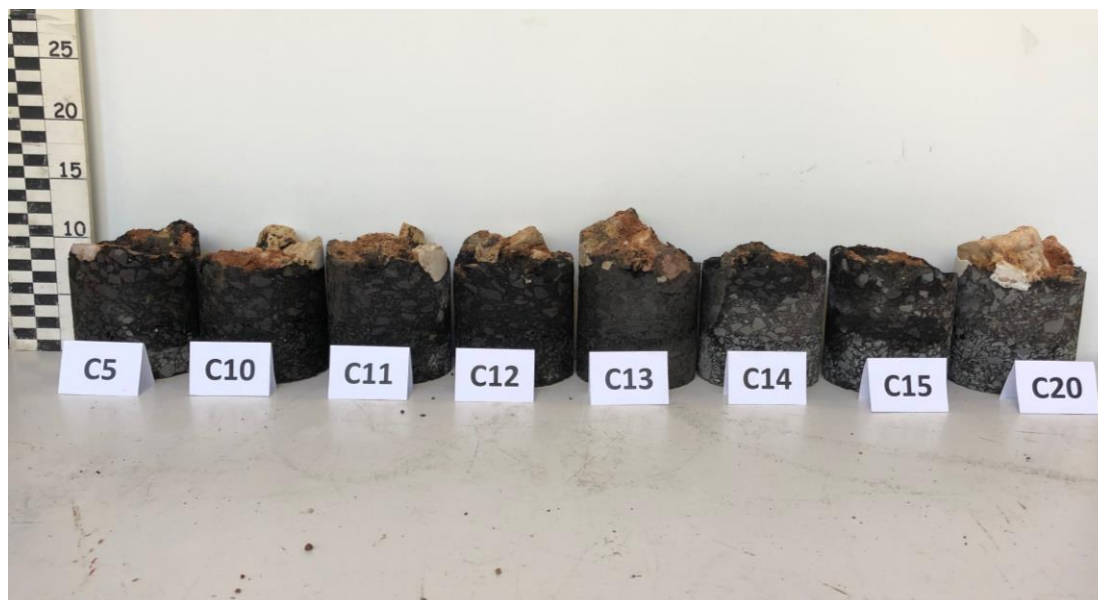


Figura 5.17 – Fotografia das carotes extraídas nos pontos de controle.

Em cada carote foram medidas as espessuras em quatro pontos igualmente afastados do perímetro e adotou-se para valor de referência da espessura da carote o valor médio destas quatro medições.

Tabela 5.4. apresentam-se os valores médios e o desvio padrão das espessuras medidas em cada um dos pontos de controle.

Tabela 5.4 – Média e desvio padrão das espessuras dos pontos de controlo.

	C 5	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C20
Média (cm)	10,9	9,9	10,3	10,1	10,4	10,6	10,1	9,9
Desvio Padrão (cm)	1,0	0,6	0,5	0,1	0,7	0,6	0,8	0,4

Note-se que, uma análise pormenorizada das carotes, permitiu ainda identificar alguma variabilidade da espessura da camada na própria carote, essencialmente derivado das grandes dimensões dos agregados da camada granular (Figura 5.18).

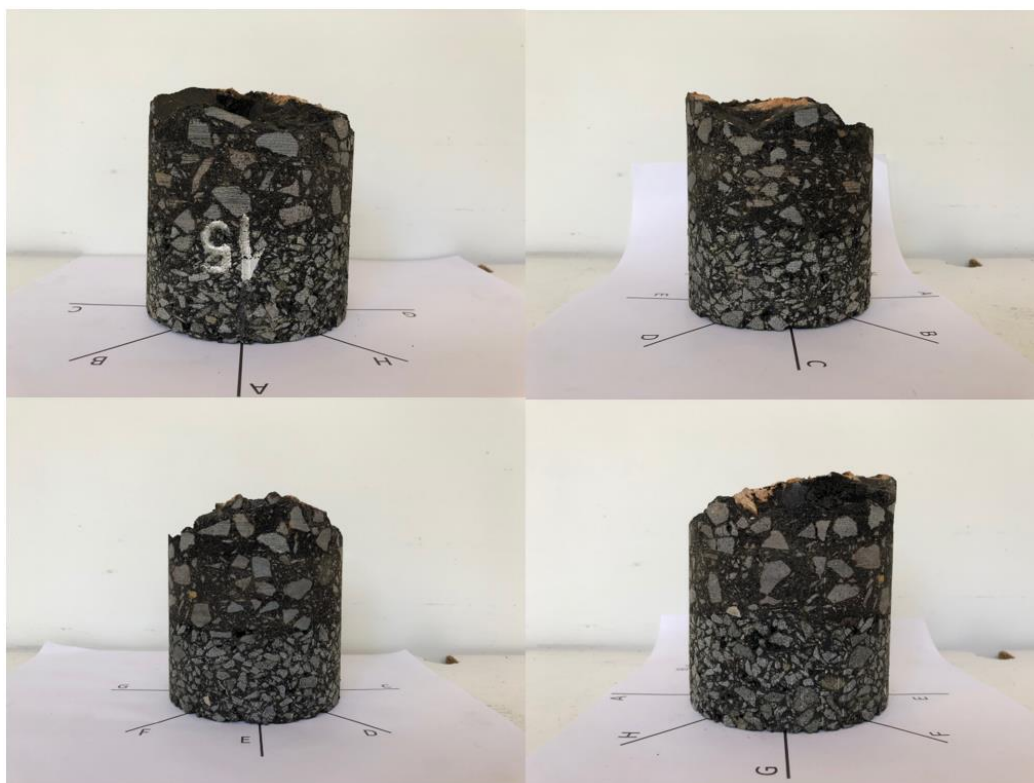


Figura 5.18 – Exemplo da irregularidade da espessura na carote do ponto de controle C15.

5.7. Precisão de resultados

Neste subcapítulo os valores de espessura estimados com o novo método analítico do CMP-AC são comparados com a espessura medida nas carotes realizadas em cada um dos oito pontos de controle. Foi ainda estimada a espessura calculada pelo método SRM, definido na equação (2.4).

A Tabela 5.5 apresenta a espessuras da camada de misturas betuminosas para os métodos tradicionais e para o novo método analítico CMP-AC, apresentadas graficamente na Figura 5.19.

Tabela 5.5 - Valores de espessura medida e estimada nos ensaios de campo.

Ponto de Controle	Espessura medida (m)	Espessura estimada (m)	
		SRM	CMP-AC
C5	0,109	0,094	0,110
C10	0,099	0,084	0,103
C11	0,103	0,097	0,097
C12	0,101	0,090	0,110
C13	0,104	0,094	0,113
C14	0,106	0,098	0,114
C15	0,101	0,100	0,112
C20	0,099	0,081	0,091

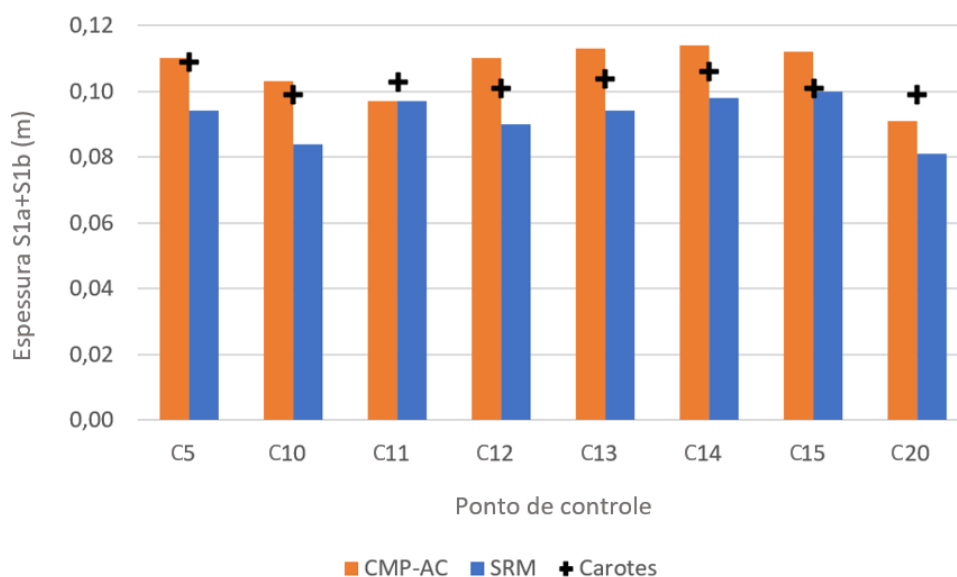


Figura 5.19 – Comparação da espessura SRM, CMP-AC, carotes.

É calculado o erro de acordo com as equações (4.1) e (4.2), para o método SRM e CMP-AC, respetivamente.

A Tabela 5.6 mostra o erro das espessuras estimadas com os métodos SRM e CMP-AC, em comparação com os valores de espessura medidos nas carotes.

Tabela 5.6 – Valores da diferença e percentagem de erro nos ensaios de campo.

Ponto de Controle	Δ (m)		Erro (%)	
	SRM	CMP-AC	SRM	CMP-AC
C5	-0,015	+0,001	13,76	0,92
C10	-0,015	+0,004	15,15	4,04
C11	-0,006	-0,006	5,83	5,83
C12	-0,011	+0,012	10,89	11,88
C13	-0,010	+0,009	9,62	8,65
C14	-0,008	+0,008	7,55	7,55
C15	-0,001	+0,011	0,99	10,89
C20	-0,018	-0,008	18,18	8,08

O erro absoluto obtido varia entre 1 e 12 mm para o novo método analítico CMP-AC, e entre 1 e 15 mm para o SRM , respetivamente. É obtido um valor médio de erro de 7,2 % e um desvio padrão de 3,3 % para o método CMP-AC, para o SRM é obtido um valor médio de erro de 10,2 % e desvio padrão de 5,2 %.

5.8. Considerações Finais

Ao longo do presente capítulo é aplicado o método analítico desenvolvido no capítulo 3 a um pavimento flexível real através da realização de ensaios de campo.

São abordados os procedimentos de realização de ensaio Radar bem como ensaios destrutivos realizados de modo a obter a espessura das carotes. Os dados recolhidos foram estudados e processados de acordo com o método CMP-AC bem como o método SRM de modo a permitir a comparação não só com carotes mas também um outro método.

Este ensaio confirmou através da obtenção de valores de erro baixos a aplicabilidade da metodologia de análise desenvolvida em casos com várias variáveis desconhecidas bem como fatores adversos a uma recolha controlada de dados, simulando uma aplicação pratica numa situação de obra real.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Após a análise levada a cabo nesta dissertação é possível concluir que o novo método analítico de determinação da espessura da camada de mistura betuminosas de pavimentos flexíveis, bem como todos os seus processos subjacentes desenvolvidos no âmbito da presente dissertação, funcionam e apresentam resultados bastante satisfatórios.

Relativamente aos ensaios em modelos físicos realizados em condições rigorosas, com um elevado controle de todas as variáveis, bem como um detalhado conhecimento das espessuras, o erro proveniente do método desenvolvido foi em todos os casos de cerca de 4,9%, sendo que o valor máximo do erro correspondeu a 7 mm, sendo este caso agravado pelo menor número de registos recolhidos, bem como a reduzida espessura do pavimento C, de 5,3 cm. Pode-se considerar que a análise com base neste método analítico foi bem sucedida e com bons resultados .

Quanto aos ensaios de campo, o erro médio obtido é inferior a 8%, sendo o erro máximo registado de 12 %, na carotes C12. Os erros aumentaram em relação aos ensaio de laboratório, uma vez que os ensaio de campo foram levados a cabo num pavimento em serviço. Como agravante para a avaliação da espessura com o Radar, refere-se que a camada de misturas betuminosas foi colocada em cima de uma camada de material granular com agregados de grandes dimensões (uma semipenetração betuminosa) que resulta numa transição irregular entre a camada de material granular e camada de mistura betuminosa dificultando uma identificação precisa da interface ente camadas.

O aumento de impulsos por ensaio (scans), de 256 para 1024, que do ponto de vista da aplicação em campo permite o uso sem dificuldades acrescidas, e devido ao processamento automático desenvolvido, produz resultados de espessura fidedignos e com valores de erro baixos quando comparados com as carotes recolhidas.

Relativamente à segunda abordagem de interpretação de dados utilizada nos ensaios de campo, de igual modo os valores obtidos foram satisfatórios, confirmando uma possível aplicação desta metodologia como uma forma de pré-tratamento de dados. No caso de desenvolvimentos extensos esta abordagem permite identificar os intervalos que contêm variações de espessura consideráveis, sendo depois dentro destes intervalos aplicadas análises locais, mais morosas em termos de interpretação para definir com precisão a zona afetada.

Deste modo, é possível afirmar que, seguindo as regras de recolha de dados descritas na presente dissertação, em conjunto com a metodologia de análise desenvolvida é possível obter de forma célere e com boa precisão os valores de espessura de pavimentos flexíveis permitindo uma interpretação espacial dos dados recolhidos. Esta informação é essencial para a análise estrutural de pavimentos em serviço.

Relativamente a sugestões de trabalhos futuros, sugere-se a adaptação do método criado para o cálculo de espessuras de camadas de agregados. O processo desenvolvido no presente estudo é na sua essência um método de análise de dados e como tal não está limitado à determinação de camadas superficiais, sendo perfeitamente capaz de determinar a espessura das camadas de agregados subjacentes à mistura betuminosa.

No caso da análise da camada superficial de pavimentos flexíveis o erro do novo método é muito baixo, contudo o método desenvolvido estima do topo para a base prolongando erros de

aproximação ao longo das camadas. No estudo das camadas de agregado o erro introduzido por aproximações sucessivas de cada camada poderá resultar no cálculo de valores de espessura diferentes do real, sendo possível um maior desenvolvimento do método para utilização em grande profundidade.

Outros trabalhos futuros consistem na validação da aplicação em pavimentos com fendilhamento e outros tipos de degradação e também a sua implementação para os pavimentos rígidos.

Referências Bibliográficas

- Al-Qadi, I., Lahouar, S., & Loulizi, A. (2002). Ground penetrating radar evaluation for flexible pavement thickness estimation, *Proc. Pavemente Eval. Conf.*
- Antunes, V., Marecos, V., Fontul, S., & Freire, A. C. (2016). Avaliação de propriedades de um pavimento rodoviário com recursos a ensaios não destrutivos. *10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*, (pp. 1-12).
- ASTM D4748-10. (2012). *Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar*. ASTM International.
- Baltazart, V., Elsworth, N., Hamouche, R., Krarup, J., Antunes, M., McRobbie, S., . . . Wright, D. (2014). Monitoring structural and surface conditions. FP7 project 285119. *Tomorrow's Road Infrastructure Monitoring and Management (TRIMM)*.
- Branco, F., Pereira, P., & Santos, L. (2011). *Pavimentos rodoviários, Quarta edição*, Almedina.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground penetrating radar. 2nd edition*. London: The Institution of Electrical Engineers. doi:10.1109/IWAGPR.2015.7292635
- Fontul, S. (2004). *Structural evaluation of flexible pavements using non-destructive tests - Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra*.
- Jol, H. M. (2009). *Ground Penetrating Radar Theory and Applications, First Edition*. ELSEVIER.
- Karasu, A. (2015). *Contemporary Trends in the Regenerative and Sustainable Built Environment: Technical and Managerial Aspects*. Nottingham Trent University.
- Leng, Z., & Al-Qadi, I. (2014). An innovative method for measuring pavement dielectric constant using the extended CMP method with two air-coupled GPR systems. *NDT & E International*, 66, pp. 90-98.
- Marecos, V. (2018). Optimisation of Ground Penetrating Radar testing at traffic speed for structural monitoring of pavements - Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Vigo.
- Marecos, V., Fontul, S., Solla, M., & Antunes, M. d. (2018). Evaluation of the feasibility of Common Mid-Point approach for air-coupled GPR applied to road pavement assessment. *Measurement*, 128, pp. 295-305.
- Marecos, V., Fontul, S., Solla, M., & Antunes, M. d. (2018). Transport infrastructures assessment using multiple GPR configurations and FWD. *Vetomac XVI*. Lisbon.
- Maser, K., & Scullion, T. (1991). Automated Pavement Subsurface Profiling using Radar: Case Studies of Four Experimental Field Sites . *Transportation Research Record 1344*, pp. 148-154.
- Maser, R. K., Holland, T., & R., R. (2002). Non-destructive measurement of layer thickness on newly constructed asphalt pavement. *Pavement Evaluation Conference* (pp. 21-25). Virginia: Transportation Research Board.

- Pajewski, L., Fontul, S., & Solla, M. (2018). Ground Penetrating Radar for the evaluation and monitoring of transport infrastructures. doi:10.1016/B978-0-12-812429-1.00010-6
- Pajewski, L., Vrtunski, M., Bugarinovic, Z., & Van Der Wielen, A. (2018). GPR System Performance Compliance according to COST Action TU1208 guidelines - GPR Association.
- Pérez-Gracia, V., Fontul, S., Santos-Assunção, S., & Marecos, V. (2016). Geophysics: Fundamentals and Applications in Structures and Infrastructures. Em M. S. Belén Rlveiro (Ed.), *Non-destructive techniques for the evaluation of structures and infrastructure* (pp. 59 - 88). London, UK: CRC Press, Taylor & Francis Group. doi:http://
- Reis, N. (2009). *Análise Estrutural de Pavimentos Rodoviários. aplicação a um pavimento reforçado com malha de aço*, - Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico.
- Saarenketo, T. (2011). Recommendations for guidelines for the use of GPR in asphalt air voids content measurement.
- Saarenketo, T., & Maijala, P. (2011). *The Use of GPR in Road Rehabilitation Projects*.
- Saarenketo, T., & Scullion, T. (2000). Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 43, pp. 119-138. doi:https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X
- Saarenketo, T., Maijala, P., & Herronen, T. (2011). *Recommendations for guidelines for the use of GPR in construction Quality Control*.
- Scorpo, A. L., & Cook, A. (2017). *Accuracy evaluation of traffic-speed coreless GPR techniques in pavement layer thickness estimation*. doi:10.1109/IWAGPR.2017.7996041
- Sensoft. (2019). *TIPS: Common Mid-Point GPR surveys using the DVL-500P*. Obtido em 24 de 08 de 2019, de Sensors & Software: <https://www.sensoft.ca/blog/cmp-survey-using-the-dvl-500p/>
- TU1208 GPR Association. (2017). *Action TU1208 Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. Obtido de COST European Cooperation in Science & Technology: <http://gpradar.eu/tu1208/index.html>